



**SÉRGIO VIVEIROS
FRANCO**

**REVESTIMENTO EXTERIOR
CONDIÇÕES CLIMATÉRICAS
MÉTODOS DE CONSERVAÇÃO**

**EXPOSTO ÀS
– ESTUDO E**



**SÉRGIO VIVEIROS
FRANCO**

**REVESTIMENTO EXTERIOR EXPOSTO ÀS
CONDIÇÕES CLIMATÉRICAS – ESTUDO E
MÉTODOS DE CONSERVAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Ao meu irmão Fábio

“O amor é a força mais abstrata e também a mais potente que há no mundo”

Gandhi

o júri

presidente

Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Fernando Joaquim Fernandes Tavares Rocha
Professor Catedrático do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Aproveito a oportunidade para dirigir a algumas pessoas o meu mais sincero agradecimento pela importância que tiveram, tanto ao longo de todo o meu percurso académico e durante toda a minha vida, contribuindo assim para a minha formação a nível pessoal e profissional, como colaborando na realização dos trabalhos laboratoriais e de recolha do material a estudar.

Em primeiro lugar, à Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, pela orientação e disponibilidade que sempre demonstrou.

Ao Professor Doutor Mário Ferreira do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da universidade de Aveiro por disponibilizar os meios necessários para a realização do trabalho de laboratório que lá foi efetuado. Agradeço ainda ao Jorge Carneiro pelo acompanhamento do ensaio realizado.

Ao Engenheiro João Silva pela ajuda na recolha das amostras de rocha estudadas.

Aos colaboradores do laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, nomeadamente a Eng^a Maria Carlos pelo apoio em todo o trabalho laboratorial realizado. Agradeço ainda ao Sr. Victor, ao Jorge Fonseca e ao Hugo Meneses pela disponibilidade para ajudar sempre que necessário e pelo bom ambiente de trabalho que sempre lá encontrei. A todos muito obrigado.

Aos funcionários da Pedreira da Palmeira, em Câmara de Lobos na Madeira, pela ajuda na recolha e preparação das amostras de rocha.

Aos meus colegas de curso e amigos, Raphael, Bruno, Paulo, Pedro, Hélder, João e Edgar, que sempre me incentivaram, apoiaram e proporcionaram momentos muitos agradáveis que guardarei para sempre.

À minha namorada Zélia, agradeço essencialmente o companheirismo, por estar sempre presente, nos momentos bons e menos bons e por nunca me deixar desistir. Gostaria também de agradecer aos seus pais e ao Hélder pela amizade que sempre demonstraram.

Finalmente aos meus pais, por serem essa grande estrutura de suporte em todo o meu percurso académico e ao longo de toda a minha vida.

palavras-chave

Pedra Natural, Condições Climáticas, Degradação, Métodos de Conservação.

resumo

O presente trabalho procura estudar as degradações impostas á pedra natural, nomeadamente quando aplicada em revestimentos exteriores, mediante exposição a determinadas condições climáticas.

Para efetuar esse estudo foram realizados ensaios, com o intuito de reproduzir em laboratório as mesmas condições e nível de degradação a que o material está sujeito quando aplicado em obra. As condições climáticas foram calibradas de acordo com a realidade da Região Autónoma da Madeira, tendo em conta que o material é oriundo de uma pedreira lá existente e por também se encontrar com muita frequência aplicado nas construções.

Será, em primeiro lugar, apresentada uma caracterização climatológica da Região Autónoma da Madeira. Será também feita referência a exemplos reais de aplicação no edificado, enumeradas exigências funcionais e uma abordagem à normalização europeia. Em seguida será apresentado todo o trabalho laboratorial efetuado, nomeadamente caracterização petrográfica e ensaios de envelhecimento. Por fim serão enunciados alguns métodos de conservação.

O trabalho laboratorial foi realizado no Departamento de Engenharia Civil e Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro.

keywords

Natural stone, Climatic Conditions, Degradation, Conservation methods.

abstract

The present work seeks to study the degradations imposed on natural stone, especially when applied in exterior coatings, by exposure to certain climatic conditions.

To perform this study, tests were carried out in order to reproduce in the laboratory the same conditions and level of degradation to which the material is subjected when applied on site. The climatic conditions were calibrated according to the reality of the Autonomous Region of Madeira, taking into account that the material comes from a quarry that there exists and because this material is very often applied in constructions.

It will be, firstly, presented a climatological characterization of the Autonomous Region of Madeira. Reference will be made to actual examples of application in buildings, listed functional requirements and an approach to European standardization. Then, all laboratory work performed, namely petrographic characterization and aging tests will be presented. Finally, some conservation methods will be enunciated.

The laboratory work was carried out in the Department of Civil Engineering and Department of Ceramic Engineering and Glass.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2 Contextualização e condições climatéricas na Madeira	7
2.1 Localização e constituição do arquipélago.....	7
2.2 Clima	8
2.2.1 Temperatura	8
2.2.2 Precipitação	8
2.2.3 Insolação.....	9
2.2.4 Humidade relativa	9
2.2.5 Velocidade do vento	9
2.2.6 Condições climatéricas extremas	10
3 Materiais pétreos utilizados no património edificado da Madeira	15
3.1 Classificação dos materiais pétreos utilizados nas construções	15
3.1.1 Exemplos de aplicação em edifícios e utensílios	18
3.2 Exigências Funcionais.....	20
3.3 Normalização / Certificação Europeia	21
3.3.1 Normalização	21
3.3.2 Certificação Europeia.....	23

4 Principais casos de degradação em revestimentos exteriores e métodos de conservação.....	27
4.1 Casos de degradação resultantes da ação direta das condições climatéricas	28
4.1.1 Eflorescências / Criptoflorescências.....	28
4.1.2 Manchas localizadas, sujidade superficial e alteração cromática	29
4.2 Casos de degradação de outra natureza.....	30
4.2.1 Graffiti.....	30
4.2.2 Contaminação biológica.....	30
4.2.3 Vegetação parasitária.....	31
4.2.4 Deficiências de planeza.....	31
4.2.5 Deterioração das juntas.....	32
4.2.6 Perda de integridade.....	32
4.2.6.1 Fracturação / Fissuração	32
4.2.6.2 Degradação do material.....	33
4.2.7 Anomalias na fixação ao suporte	34
4.2.7.1 Degradação das fixações	34
4.2.7.2 Descolamento	35
4.2.8 Lacuna parcial e lascagem do elemento pétreo.....	35
4.3 Métodos de conservação	36
4.3.1 Dessalinização.....	36
4.3.2 Consolidação.....	37
4.3.3 Hidrofugação.....	38
4.3.4 Consolidação - Hidrofugação	39
5 Trabalho Laboratorial.....	43
5.1 Identificação do material em estudo.....	43

5.2	Caracterização física e mecânica das rochas	44
5.2.1	Parâmetros de caracterização	44
5.2.1.1	Método do cesto de rede metálica	44
5.2.1.2	Massa volúmica.....	45
5.2.1.3	Absorção de água.....	45
5.2.1.4	Porosidade aberta.....	45
5.2.1.5	Densidade aparente.....	46
5.2.2	Absorção de água por capilaridade	46
5.2.3	Ensaio de Pundit (Ultrassons).....	47
5.2.4	Determinação do Módulo de Elasticidade	49
5.3	Ensaio de envelhecimento artificial acelerado	49
5.3.1	Ensaio de resistência à cristalização de sais	49
5.3.1.1	Geometria e preparação dos provetes.....	51
5.3.1.2	Procedimento de ensaio	51
5.3.2	Ensaio de resistência ao envelhecimento por variação de temperatura e humidade	53
5.3.2.1	Envelhecimento acelerado.....	54
5.3.3	Ensaio de resistência ao envelhecimento por ação do nevoeiro salino.....	55
5.3.3.1	Importância do fenómeno no Arquipélago da Madeira.....	58
5.3.3.2	Fundamentos.....	59
5.3.3.3	Metodologia.....	59
5.4	Determinação da resistência mecânica.....	61
6	Apresentação e discussão de resultados.....	65
6.1	Método do cesto de rede metálica	65
6.2	Massa volúmica.....	66

6.3	Absorção de água	67
6.4	Porosidade aberta	68
6.5	Densidade aparente	69
6.6	Absorção de água por capilaridade	71
6.7	Ensaio de Pundit.....	81
6.8	Determinação do Módulo de Elasticidade	83
6.9	Ensaio de envelhecimento acelerado	84
6.9.1	Ensaio de resistência à cristalização de sais	84
6.9.2	Ensaio de resistência ao envelhecimento por variação de temperatura e humidade relativa	90
6.9.3	Ensaio de resistência ao envelhecimento por ação do nevoeiro salino.....	95
6.10	Determinação da resistência mecânica	100
7	Conclusão	105
7.1	Considerações finais.....	105
7.2	Propostas de trabalho futuro.....	106
	Referências Bibliográficas.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização e constituição da Região Autónoma da Madeira	7
Figura 2 – Localização das explorações de pedra natural do Arquipélago da Madeira	15
Figura 3 - Cantaria "rija" – Traquibasalto	16
Figura 4 - Cantaria “branco-sujo” - Traquito	16
Figura 5 - Cantaria "mole" cor de rosa	16
Figura 6 - Cantaria "mole" vermelha	17
Figura 7 - Cantaria "mole" - preta-esverdeada	17
Figura 8 - Cantaria "mole" castanha-esverdeada	18
Figura 9 – a) Moinho de mão utilizado na moagem de cereais; b) Forno de cozer pão	18
Figura 10 – a) Pedra do bolo do caco; b) Filtro de água	18
Figura 11 – Palácio da Justiça do Funchal; b) Entrada do cemitério de S. Martinho no Funchal	19
Figura 12 – a) Fachada da Câmara Municipal do Funchal; b) Fachada com torre aberta do antigo Banco da Madeira	19
Figura 13 – a) Fachada principal da Igreja da Sé no Funchal; b) Fachada principal e lateral da Igreja da Sé no Funchal	19
Figura 14 - Exemplo de uma declaração de conformidade para lajes de pedra natural	24
Figura 15 - Anomalias estéticas – eflorescências e manchas localizadas (devido ao material de colagem e devido à humidade ascensional)	30
Figura 16 - Anomalias estéticas – sujidade superficial e graffiti	30
Figura 17 - Principais microorganismos responsáveis por biodeterioração na pedra natural	31
Figura 18 - Vegetação parasitária existente entre duas placas pétreas e colonização biológica	31
Figura 19 - Deficiências de planeza do revestimento	32

Figura 20 - Falta de linearidade da junta entre placas pétreas, perda de material de colmatação das juntas e lascagem do material pétreo na proximidade da junta	32
Figura 21 – Fracturação e fissuração da placa pétreo	33
Figura 22 - Degradação do material: erosão, esfoliação e alveolização	34
Figura 23 - Dois casos de perda de um elemento pétreo no revestimento e flexão do elemento de fixação	35
Figura 24 - Lacuna e lascagem do elemento pétreo na zona das fixações metálicas	36
Figura 25 - Tipos de rocha estudados.	43
Figura 26 - Estado inicial dos provetes, antes de serem submetidos a envelhecimento, sendo: a) Traquibasalto; b) Traquito; c) Tufo (cor de rosa); d) Tufo Lapilli Castanho; e) Tufo Lapilli Preto.	43
Figura 27 - Exemplo do equipamento utilizado na realização do método do cesto de rede metálica.	44
Figura 28 – Ensaio de capilaridade.....	47
Figura 29 – a) vista geral do equipamento utilizado no teste e amostras de rocha; b) Pormenor ilustrativo da forma como os transdutores devem estar em contacto com a amostra de rocha em análise.....	48
Figura 30 - a) Aparelho para ensaios ultrassónico PUNDIT; b) Barra de calibração.....	49
Figura 31 - Ciclo para realização do ensaio de resistência à cristalização de sais	52
Figura 32 - Material utilizado na realização do ensaio de cristalização de sais.	53
Figura 33 - Câmara de temperatura e humidade ARL-0680 e amostras sujeitas a envelhecimento.	54
Figura 34 - Gama controlável de temperatura e humidade (CORP., 2017).....	55
Figura 35 - a) Ciclo de Verão; b) Ciclo de Inverno.	55
Figura 36 - Percentagem média dos iões presentes nas águas dos oceanos	57

Figura 37 - a) Fachada da fortaleza espanhola de Bizerte; b) Alteração alveolar em calcarenito deteriorado; c) em cima: bloco deteriorado, em baixo: bloco com aspeto normal.	58
Figura 38 - Camara salina CO.FO.ME.GRA SRL 610/400 utilizada na realização do ensaio.	60
Figura 39 - Carga perpendicular aos planos de anisotropia	61
Figura 40 - a) <i>SHIMADZU: AG-IC 100 KN</i> ; b) <i>FORM+TEST PRÜFSYSTEME BETA 2-3000 D 3000 KN</i> .	62
Figura 41 - a) Ensaio de resistência á compressão (<i>SHIMADZU: AG-IC 100 KN</i>); b) Ensaio de resistência à compressão (<i>FORM+TEST PRÜFSYSTEME BETA 2-3000 D 3000 KN</i>).	62
Figura 42 - Curva de capilaridade do provete TQ4.	71
Figura 43 - Curva de capilaridade do provete TQ5	72
Figura 44 - Curva de capilaridade do provete T4.	73
Figura 45 - Curva de capilaridade do provete T5	73
Figura 46 - Curva de capilaridade do provete T6	74
Figura 47 - Curva de capilaridade do provete Tf4.	75
Figura 48 - Curva de capilaridade do provete Tf5	75
Figura 49 - Curva de capilaridade do provete Tf6	76
Figura 50 - Curva de capilaridade do provete TLC4	77
Figura 51 - Curva de capilaridade do provete TLC5	77
Figura 52 - Curva de capilaridade do provete TLC6	78
Figura 53 - Curva de capilaridade do TLP4.	79
Figura 54 - Curva de capilaridade do TLP5.	79
Figura 55 - curva de capilaridade do TLP6	80
Figura 56 - Variação do coeficiente de capilaridade para os vários tipos de rocha.	81
Figura 57 - Valores médios do módulo de elasticidade.	83

Figura 58 - Variação de massa do Traquibasalto.....	84
Figura 59 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 7º ciclo; c) Provete após o 15º ciclo.	85
Figura 60 - Variação de massa do Traquito	85
Figura 61 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 7º ciclo; c) Provete após o 14º ciclo.	86
Figura 62 – Variação de massa do Tufo (Cor de rosa).	86
Figura 63 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 3º ciclo; c) Provete após o 6º ciclo.	86
Figura 64 - Variação de massa do Tufo Lapilli Castanho	87
Figura 65 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 2º ciclo; c) Provete após o 4º ciclo.	87
Figura 66 - Variação de massa do Tufo Lapilli Preto.....	88
Figura 67 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 3º ciclo; c) Provete após o 5º ciclo.	88
Figura 68 - a) Estado inicial dos provetes; b) Estado dos provetes concluído o ensaio.	89
Figura 69 - Variação de massa do Traquibasalto.....	90
Figura 70 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 10º ciclo; c) Provete após o 20º ciclo.....	91
Figura 71 – Variação de massa do Traquito.	91
Figura 72 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 10º ciclo; c) Provete após o 20º ciclo.....	92
Figura 73 - Variação de massa do Tufo (Cor de rosa).....	92
Figura 74 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 10º ciclo; c) Provete após o 20º ciclo.....	93
Figura 75 - Variação de massa do Tufo Lapilli Castanho	93

Figura 76 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 10º ciclo; c) Provete após o 20º ciclo.....	93
Figura 77 - Variação de massa do Tufo Lapilli Preto	94
Figura 78 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 10º ciclo; c) Provete após o 20º ciclo.....	94
Figura 79 - Variação de massa do Traquibasalto.....	95
Figura 80 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 12º ciclo; c) Provete após o 25º ciclo	95
Figura 81 - Variação de massa do Traquito.....	96
Figura 82 – a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 12º ciclo; c) Provete após o 25º ciclo.....	96
Figura 83 - Variação de massa do Tufo (Cor de rosa).....	97
Figura 84 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 12º ciclo; c) Provete após o 25º ciclo.....	97
Figura 85 - Variação de massa do Tufo Lapilli Castanho.	98
Figura 86 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 12º ciclo; c) Provete após o 25º ciclo.....	98
Figura 87 - Variação de massa do Tufo Lapilli Preto.....	99
Figura 88 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 12º ciclo; c) Provete após o 25º ciclo.....	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Temperatura máxima e mínima média anual.....	8
Tabela 2 – Quantidade de precipitação média anual.	9
Tabela 3 – Insolação anual.....	9
Tabela 4 – Humidade Relativa média anual.	9
Tabela 5 – Velocidade média anual do vento.	10
Tabela 6 – Exigências funcionais da pedra natural	20
Tabela 7 – Tipos de rocha e número de amostras a utilizar.....	60
Tabela 8 - Valores resultantes do método do cesto de rede metálica.	65
Tabela 9 - Cálculo da massa volúmica.	66
Tabela 10 - Cálculo dos valores percentuais de absorção de água.	67
Tabela 11 - Cálculo da porosidade.....	68
Tabela 12 - Cálculo da densidade.	69
Tabela 13 - Tabela resumo dos parâmetros calculados anteriormente.	70
Tabela 14 - Coeficiente de capilaridade do Traquibasalto.....	72
Tabela 15 - Coeficiente de capilaridade do Traquito.....	74
Tabela 16 - Coeficiente de capilaridade do Tufo (cor de rosa).....	76
Tabela 17 - Coeficiente de capilaridade do TLC	78
Tabela 18 - Coeficiente de capilaridade do TLP	80
Tabela 19 - Valores obtidos através do Ensaio de Pundit.....	81
Tabela 20 - Valores do Módulo de Elasticidade para cada tipo de rocha.....	83
Tabela 21 - Número de ciclos que cada tipo de rocha resistiu.....	89
Tabela 22 - Tabela resumo dos valores médios, em Mpa, do ensaio de compressão.	101

CAPÍTULO 1

Introdução

Enquadramento

Objetivos

Estrutura da Dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A pedra natural foi desde sempre muito solicitada na construção. Inicialmente utilizada na construção de monumentos veio depois a ser também empregue na construção vernacular. A grande procura por este material assenta no facto de ser extremamente durável, como é possível verificar nas construções existentes. No entanto, cada vez mais se assiste ao facto de a pedra ser utilizada como material de revestimento do que propriamente como elemento resistente. Portugal constitui um dos maiores produtores a nível mundial no sector da indústria pétrea ornamental, possuindo de facto uma enorme variedade de pedra natural, sendo, portanto, expectável que se opte cada vez mais por este tipo de revestimento (A. Silva, 2009)(Aires-Barros, 2002).

É importante, nesta fase, clarificar a terminologia aplicada no sector da pedra natural, que nem sempre é uniforme, onde a definição de “rocha ornamental” é frequentemente utilizada como sinónimo de “pedra natural” ou até “pedra ornamental”. Para o efeito devem ser consideradas as seguintes definições (Amaral P.M., Fernandes J.C., Pires V., 2015):

- **Rocha ornamental** – Matéria-prima de origem geológica que é extraída atendendo às suas capacidades ornamentais intrínsecas. A rocha é, portanto, classificada como de uso ornamental, pois, como exemplos, poderá ser usada num colar, numa peça de estatuária, num painel iluminado, numa fachada ventilada de um edifício, ou seja, para fins em que as características decorativas e ornamentais da rocha se impõem pela sua elevada beleza natural.
- **Pedra natural** – Material geológico com características físicas, mecânicas e químicas intrínsecas e que pode ser utilizado em diversas situações consoante possua determinados requisitos, designadamente em aplicações estruturais com ou sem fim ornamental (a título de exemplo, uma rocha pode ser utilizada como soleira sem pretensão de ser ornamental).
- **Produto de pedra natural** – Produto acabado ou semiacabado constituído exclusivamente por pedra natural o que pode ou não ser considerado como um produto originário especificamente de uma rocha ornamental (a matéria-prima). Ou

seja, poderá apenas ser constituído de uma rocha sem valor (aparente) ornamental, mas que constituída num determinado produto serve para um determinado fim. Nesta definição excluem-se quaisquer tratamentos (superficiais, de incremento de resistência, etc.) aplicados aos produtos de pedra natural.

A aplicação de revestimentos de pedra natural em edifícios tem como finalidade atribuir-lhes um dignidade e notabilidade acrescidas. Quando a aplicação se realiza em paramentos exteriores, representam uma melhoria estética, mas também, e mais importante, uma barreira de proteção. A pedra deve, por isso, possuir características que garantam resistência mecânica ao choque, ao desgaste e agentes ambientais agressivos. Este material é uma mais valia a nível estético, visto existir uma grande diversidade (várias formas e texturas). A combinação dessa particularidade com a durabilidade que lhe é reconhecida, alicia arquitetos e donos de obra à sua utilização. Os revestimentos de pedra são constituídos pelas placas de pedra, o sistema de fixação ao suporte e as juntas entre placas. No que diz respeito ao sistema de fixação das placas ao suporte, normalmente são de dois tipos (Veiga & Malanho, 2009):

- **Direta** – aplicação por colagem com argamassa-cola ou outros produtos de colagem. Quando se trate de placas de dimensões e peso elevados, apresenta limitações a nível de segurança o que não é recomendado pelo LNEC, havendo, por exemplo, o perigo de queda de uma peça de um andar elevado, o que põe em risco a vida das pessoas que frequentem a zona.
- **Indireta** – neste tipo de fixação as pedras são aplicadas através de peças metálicas, regra geral, gatos resistentes chumbados ao suporte ou estrutura intermédia. A utilização deste sistema de fixação prevê a existência de uma caixa de ar, entre 20 e 50 mm, ventilada. O revestimento pode ser considerado de estanquidade, desde que possua dispositivos para eliminar a água infiltrada.

A ação dos agentes atmosféricos sobre os materiais pétreos tem vindo a piorar nas últimas décadas a um ritmo acelerado, devido a um crescente aumento da poluição ambiental urbana e industrial. É por isso fundamental que se dê muita importância à questão da conservação do património edificado e é também por isso que têm sido já realizados inúmeros estudos sobre as rochas, nomeadamente sobre o seu comportamento ao longo do tempo de exposição. Os revestimentos, mais em concreto revestimentos em pedra, são o elemento utilizado na construção que mais está sujeito às ações de degradação. Estes assumem o papel de primeira

proteção da estrutura, tendo por isso também uma vida útil menor. Posto isto, é pertinente que se estude em que medida são afetados estes revestimentos pelas condições climáticas e que métodos existem e quais são os mais aconselháveis ou adequados para a sua conservação (A. Silva, 2009).

1.2 Objetivos

A dissertação tem como principal objetivo a avaliação da degradação imposta aos materiais pétreos, aplicados em fachadas de edifícios, expostos às condições climáticas. O trabalho laboratorial será realizado utilizando provetes de rochas recolhidas numa pedreira na ilha da Madeira.

A pretensão é que, no final do estudo, sejam conhecidas as características físicas e mecânicas das rochas. Para o efeito serão realizadas diversas técnicas laboratoriais e ensaios de envelhecimento acelerado, para que melhor se perceba qual o nível de degradação imposto ao material.

Após a realização do trabalho laboratório será possível concluir quais dos ensaios de envelhecimento acelerado estudados (cristalização de sais, variação de temperatura e humidade e nevoeiro salino) provocam maior desgaste nas rochas e quais as que têm um comportamento melhor face a essas mesmas condições.

1.3 Estrutura da Dissertação

Em relação á estruturação da dissertação, esta desenvolve-se em sete capítulos. No capítulo 1, introdução, é feito um enquadramento e são enunciados os objetivos e apresentada a estrutura da dissertação. No capítulo 2 são abordadas as condições climáticas da Região Autónoma da Madeira (local onde foi feita a recolha das rochas estudadas). No capítulo 3 é feita referência ao património edificado da Madeira onde serão exploradas três vertentes: classificação dos materiais pétreos utilizados nas construções, exigências funcionais e normalização europeia. No capítulo 4 são enumerados os principais casos de degradação em revestimentos exteriores e métodos de conservação. No capítulo 5 far-se-á referência a todo o trabalho laboratorial realizado. No capítulo 6 será feita a apresentação e respetiva discussão

de resultados. Por fim, no capítulo 7 serão apresentadas as conclusões e indicadas propostas de trabalho futuro.

CAPÍTULO 2

Contextualização e condições climáticas na Madeira

Localização e constituição do arquipélago

Clima

2 CONTEXTUALIZAÇÃO E CONDIÇÕES CLIMATÉRICAS NA MADEIRA

2.1 Localização e constituição do arquipélago

O Arquipélago da Madeira fica situado no Oceano Atlântico, a Oeste da Europa Meridional, entre as costas de Portugal e Marrocos e os Arquipélagos dos Açores e Canárias, entre as latitudes aproximadas 32° 31' e 33° 31' N e as longitudes aproximadas 16° 30' e 17° 30' W (J. Silva & Gomes, 1997).

Com área total de 796,8 Km², de acordo com o Instituto Geográfico e Cadastral (Missão da Madeira), o arquipélago é formado pela ilha da Madeira (736,7 Km²) e pela ilha do Porto Santo (42,2 Km²), que está situada a 21 milhas para NE da Madeira, e ainda por dois grupos de ilhas não habitadas, consideradas reservas naturais, as Desertas (14,2 km²) e as Selvagens (3,6 km²) (J. Silva & Gomes, 1997).

O arquipélago da Madeira é constituído pelas ilhas da Madeira e do Porto Santo e ainda pelas reservas naturais das ilhas Desertas e das ilhas Selvagens. Este arquipélago constitui, juntamente com os arquipélagos atlânticos dos Açores, Canárias e Cabo Verde a região biogeográfica da Macaronésia. Na figura seguinte é apresentada a localização e constituição do Arquipélago da Madeira (Neves, 2013).



Figura 1 – Localização e constituição da Região Autónoma da Madeira (“Nós cidadãos e a região autónoma da Madeira”, 2017).

2.2 Clima

Em termos gerais o clima da Madeira é predominantemente temperado com características oceânicas, variando de seco a húmido e de moderadamente chuvoso a excessivamente chuvoso com o aumento da altitude. Para a mesma altitude o flanco norte apresenta um clima com maior índice de pluviosidade e temperaturas com variações mais bruscas relativamente ao flanco sul (J. Silva & Gomes, 1997).

O clima de toda a região apresenta características idênticas ao mediterrâneo, ou seja, tem uma estação seca relativamente bem definida no verão, mas ainda assim com temperaturas mais regulares o que permite aos habitantes das ilhas desfrutar de condições de conforto que são pouco usuais, se tivermos em conta as realidades de outras localidades europeias.

Os dados referentes ao clima da Região Autónoma da Madeira, foram adquiridos através da consulta das fichas climatológicas do último ciclo climático (1971 a 2000) e recolhidos por 4 estações meteorológicas (Areeiro, Santana, Funchal e Porto Santo).

2.2.1 Temperatura

Em relação á temperatura, os valores registados nas várias estações meteorológicas foram os seguintes:

Tabela 1 – Temperatura máxima e mínima média anual.

	Estações Meteorológicas			
	Areeiro	Santana	Funchal	Porto Santo
Temperatura máxima média anual (°C)	12,1	18,3	22,1	21,1
Temperatura mínima média anual (°C)	5,4	12,7	15,9	16,1

2.2.2 Precipitação

A média anual da precipitação total assume, de acordo com as várias estações, os seguintes valores:

Tabela 2 – Quantidade de precipitação média anual.

	Estações Meteorológicas			
	Areeiro	Santana	Funchal	Porto Santo
Média anual da quantidade de precipitação (mm)	2.619,8	1.382,8	596,4	361,3

2.2.3 Insolação

A insolação anual que ocorreu foi registada da seguinte forma:

Tabela 3 – Insolação anual.

	Estações Meteorológicas			
	Areeiro	Santana	Funchal	Porto Santo
Insolação anual (h)	2.053,2	-	2.057,3	2.156,6

2.2.4 Humidade relativa

A variação da humidade relativa do ar ao longo de todo o arquipélago foi a seguinte:

Tabela 4 – Humidade Relativa média anual.

	Estações Meteorológicas			
	Areeiro	Santana	Funchal	Porto Santo
Humidade relativa média anual (%)	76	81	72	77

2.2.5 Velocidade do vento

Em termos de velocidade do vento os valores registados foram os apresentados em seguida:

Tabela 5 – Velocidade média anual do vento.

	Estações Meteorológicas			
	Areeiro	Santana	Funchal	Porto Santo
Velocidade média anual do vento (Km/h)	-	-	7,6	16,7

As estações meteorológicas Areeiro e Santana não possuem dados do parâmetro velocidade do vento.

2.2.6 Condições climatéricas extremas

No que diz respeito a fenómenos climatéricos invulgares, há registo de vários na Região Autónoma da Madeira. Em seguida é feita referencia a alguns exemplos por ordem cronológica (Sepúlveda, 2011)(Mata et al., 2013).

Em 26 de Outubro de 1962 “choveu torrencialmente em toda a ilha. As águas transbordaram da vala de captação das chuvas, no sítio do Dragoal, precipitando-se pela encosta e penetrando nas casas de moradia e estabelecimentos da vila, onde, nalguns sítios, atingiu cerca de um metro de altura. No novo hotel, as caves onde se encontram as caldeiras ficaram inundadas. No aeroporto não há notícias de que tivesse havido estragos ou outros prejuízos ocasionados pelas chuvas. Nas ribeiras que atravessam a ilha a corrente era impetuosa...”.

Em 8 de Março de 1970 registou-se também um fenómeno climatérico fora do comum. “Uma tromba de água flagelou o Porto Santo durante 11 horas”. Nesta data ocorreu trovoadas forte e chuva torrencial. Segundo descrito, na altura, pelos habitantes do Porto Santo, não havia memória de uma precipitação tão forte e num curto espaço de tempo. A chuva sentiu-se com maior intensidade na vila e no lado leste da ilha, tendo causado grandes estragos a vários níveis (em paredes, culturas e estradas). Causou ainda a morte de uma criança no sítio do Tanque.

Em 3 de Dezembro de 1977, “Chuva diluviana e vento ciclópico flagelaram o Porto Santo, inundando estradas e interrompendo as ligações com o exterior”. “A chuva abundante fez transbordar as represas e transformou as ruas em autênticas ribeiras”. “As estradas ficaram

todas bloqueadas, também pela lama arrastada pela água”. “As casas nas zonas mais baixas, foram inundadas devido ao entupimento dos esgotos”. “Á água correu com tanta força que tudo arrastou, inclusivamente, chegou a cavar os alicerces de duas moradias que ficaram suspensas. Os prejuízos foram consideráveis, na agricultura e o gado foi quase dizimado. Á água lamacenta arrastou tudo o que encontrou pela frente.”

Em 31 de Janeiro de 1988. Este temporal atingiu o arquipélago da Madeira provocando grandes estragos e registou, em particular, no Porto Santo valores de precipitação anormais na ordem do $32,2 \text{ l/m}^2$. O vento chegou a atingir os 80km/h. (Sepúlveda, 2011)

Por último, importa ainda fazer referência ao evento meteorológico monstruoso que assolou o arquipélago da Madeira em **20 de fevereiro de 2010**, em que foram registados em todo o arquipélago e em particular na ilha do Porto Santo valores de precipitação e velocidade do vento altíssimos que resultaram numa quantidade enorme de estragos a nível material e também perdas humanas.

Nesta data, 20 de Fevereiro, no Porto Santo, o ventou soprou a cerca de 100,8 Km/h e a nível de precipitação registou 65,8mm.

CAPÍTULO 3

Materiais pétreos utilizados no património edificado da Madeira

Classificação dos materiais pétreos utilizados nas
construções

Exigências funcionais

Normalização / Certificação Europeia

3 MATERIAIS PÉTREOS UTILIZADOS NO PATRIMÓNIO EDIFICADO DA MADEIRA

3.1 Classificação dos materiais pétreos utilizados nas construções

As principais rochas vulcânicas aplicadas nos monumentos e edifícios do Arquipélago da Madeira, comercialmente são designadas por: cantarias “rijas” e por cantarias “moles”. As cantarias “rijas” compreendem essencialmente as tipologias traquibasalto, traquiandesito, tefrito e traquito que exibem cor cinzenta. As cantarias “moles” são representadas pelas tipologias tufo, tufo de lapili, tufo brecha e brecha piroclástica e apresentam textura porosa a muito porosa e um grande espectro de tonalidades (J. Silva, 2007).

Se observarmos o património edificado da Região Autónoma da Madeira, verificamos que há seis tipos de rocha que são utilizadas com mais frequência: traquito, traquibasalto, três variantes de tufo de lapili e tufo (Franco, 2017).

Na figura seguinte estão identificadas as pedreiras existentes no Arquipélago da Madeira e em particular a pedreira da Palmeira (onde foram recolhidas as amostras).

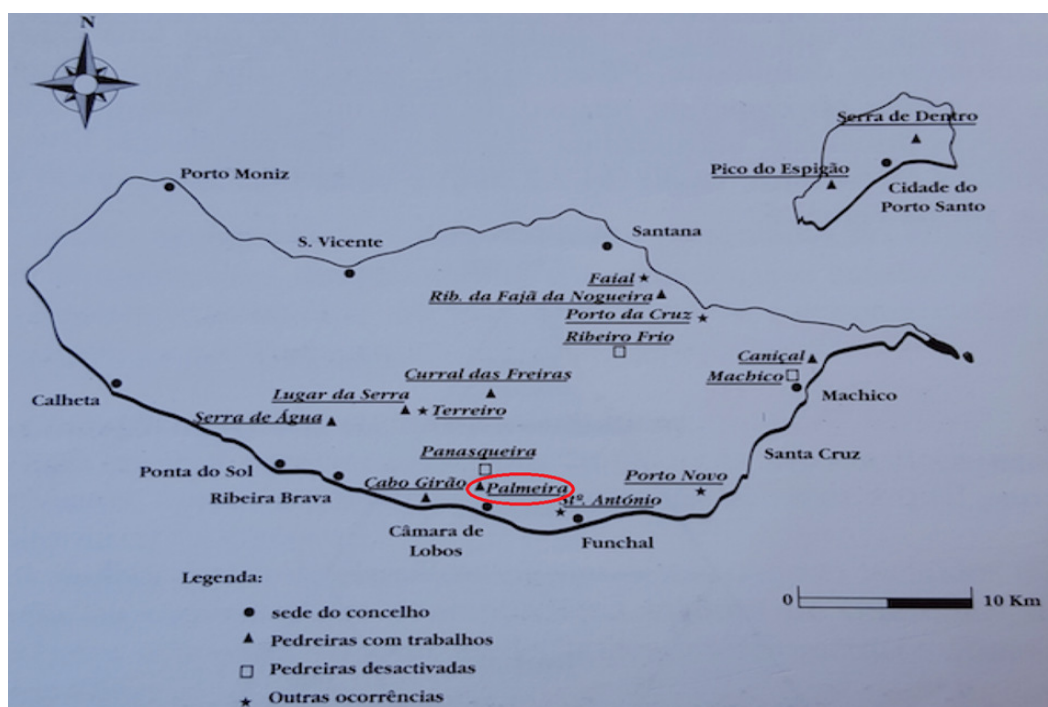


Figura 2 – Localização das explorações de pedra natural do Arquipélago da Madeira (J. Silva & Gomes, 1997).

As tipologias referidas anteriormente, e agora apresentadas com maior detalhe, são as seguintes (J. Silva & Gomes, 2004);(J. Silva & Gomes, 1997):

Traquibasalto: conhecido como cantaria “rija”, é uma rocha vulcânica efusiva de cor cinzenta. Elevada porosidade de pequenas dimensões.



Figura 3 - Cantaria "rija" – Traquibasalto (J. Silva & Gomes, 2016).

Traquito: é conhecido vulgarmente por cantaria branco-sujo do Porto Santo. É uma rocha vulcânica efusiva de cor cinzento-claro com baixa ou nenhuma porosidade.



Figura 4 - Cantaria “branco-sujo” - Traquito (J. Silva & Gomes, 2016).

Tufo: também conhecido como cantaria “mole” cor de rosa. É uma rocha tufácea.



Figura 5 - Cantaria "mole" cor de rosa (J. Silva & Gomes, 2016).

Tufo de Lapilli: também conhecido como cantaria “mole” vermelha-alaranjada. É uma rocha piroclástica com elevada porosidade possuindo clastos de dimensões reduzidas.

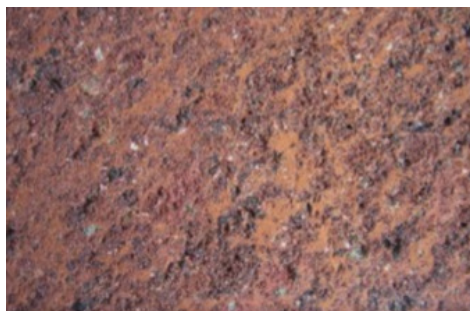


Figura 6 - Cantaria "mole" vermelha (J. Silva & Gomes, 2016).

Tufo de Lapilli: também conhecido como cantaria “mole” preta-esverdeada. É uma rocha piroclástica com elevada porosidade possuindo clastos de dimensões que podem variar entre 2 e 64mm.



Figura 7 - Cantaria "mole" - preta-esverdeada (J. Silva & Gomes, 2016).

Tufo de Lapilli: também conhecido como cantaria “mole” castanha-esverdeada. É uma rocha piroclástica com elevada porosidade possuindo clastos de dimensões que podem variar entre 2 e 10mm.



Figura 8 - Cantaria "mole" castanha-esverdeada (J. Silva & Gomes, 2016).

3.1.1 Exemplos de aplicação em edifícios e utensílios

A pedra natural é desde há muito tempo aplicada nas construções. Essa aplicação é feita das mais variadas formas, desde os métodos mais ancestrais até os mais atuais e complexos. Em seguida apresentam-se alguns exemplos de como se pode encontrar a pedra aplicada.

- Exemplos de utilização da pedra, em instrumentos de trabalho que faziam parte do quotidiano das pessoas.



Figura 9 – a) Moinho de mão utilizado na moagem de cereais; b) Forno de cozer pão (J. Silva & Gomes, 2016).



Figura 10 – a) Pedra do bolo do caco; b) Filtro de água (J. Silva & Gomes, 2016).

- Em seguida são apresentados alguns exemplos de aplicação em edifícios públicos.

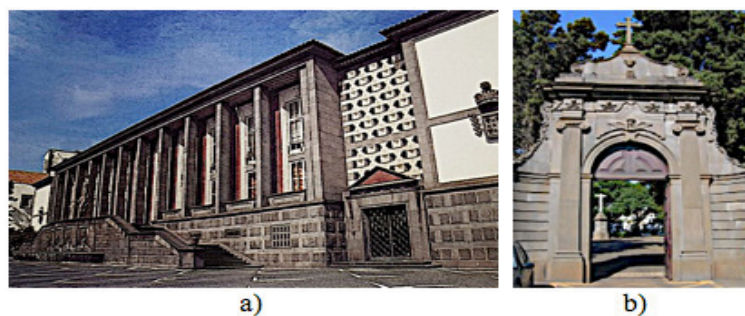


Figura 11 – Palácio da Justiça do Funchal; b) Entrada do cemitério de S. Martinho no Funchal (J. Silva & Gomes, 1997).



Figura 12 – a) Fachada da Câmara Municipal do Funchal; b) Fachada com torre aberta do antigo Banco da Madeira (J. Silva & Gomes, 1997).



Figura 13 – a) Fachada principal da Igreja da Sé no Funchal; b) Fachada principal e lateral da Igreja da Sé no Funchal (J. Silva & Gomes, 1997).

3.2 Exigências Funcionais

Os materiais pétreos, assim como qualquer material utilizado na construção civil, mais concretamente em revestimentos de paredes, por serem parte integrante de um determinado edifício devem satisfazer determinadas exigências de modo a garantirem as necessidades e segurança dos seus utilizadores e todas as pessoas que circulem na sua envolvente. Assim sendo na tabela seguinte são apresentados alguns exemplos que julgamos serem os mais relevantes (Mendes da Silva et al., 2009);(A. Silva, 2009);(J. M. B. Silva, 2013).

Tabela 6 – Exigências funcionais da pedra natural (Mendes da Silva et al., 2009);(A. Silva, 2009);(J. M. B. Silva, 2013).

Exigências de segurança	Exigências de estabilidade; Exigências contra riscos de incêndio; Exigências de segurança no uso.
Exigências de estanquidade	Exigências de estanquidade á água.
Exigências de durabilidade	Exigências de resistência aos agentes climáticos; Exigências de resistência aos produtos químicos do ar; Exigências de resistência à erosão provocada pelas partículas sólidas em suspensão no ar; Exigências de resistência à fixação e ao desenvolvimento de bolores.
Exigências de compatibilidade com o suporte ou apoio	Exigências de compatibilidade geométrica; Exigências de compatibilidade mecânica; Exigências de compatibilidade química.
Exigências termo -higrométricas	Exigências de isolamento térmico; Exigências de secura dos paramentos interiores.
Exigências de conforto acústico	Exigências de conforto acústico.

Exigências de adaptação à utilização normal	<p>Exigências de resistência a ações de choque e atrito;</p> <p>Exigências de resistência à ação da água;</p> <p>Exigências de aderência ao suporte;</p> <p>Exigências de resistência à suspensão de cargas.</p>
Exigências de conforto visual	<p>Exigências de planeza;</p> <p>Exigências de verticalidade;</p> <p>Exigências de retidão das arestas.</p>

3.3 Normalização / Certificação Europeia

3.3.1 Normalização

A pedra natural é um material frequentemente utilizado em construções, tanto por questões relacionadas com a estética como pela sua resistência, durabilidade e imponência. Assim sendo, no sentido de se garantir qualidade no produto comercializado e a sua correta aplicação em obra, foram criadas normas que estabelecem, mediante a utilização e tipo de aplicação, as características (físico-mecânicas) que a pedra deve possuir (“<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137387835/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>,” 2005).

Em 1989 foi aprovada a Diretiva 89/106/CEE ou Diretiva dos Produtos de Construção (DPC). Esta diretiva tem como objetivo a facilitação da comercialização na União Europeia e acaba também por incentivar a procura de produtos com certificação (marcação CE) (Velho & Castro, 2004).

Importa referir que existem, para os vários produtos disponíveis para comercialização, normas que podem ser normas de aplicação voluntária – “Normas Voluntárias” e de aplicação essencial – “Normas Harmonizadas”. As normas harmonizadas produzem efeitos dentro do espaço europeu e possibilitam uma maior eficácia nas trocas comerciais, tanto a nível da produção como também dos consumidores. Estas normas funcionam como agente facilitador, contribuindo para um melhor entendimento entre os diversos intervenientes no

processo, desde a fase de produção, passando pela transformação e distribuição e finalmente a fase de comercialização do produto final (“<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137387835/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>,” 2005).

Estas normas foram desenvolvidas com o intuito de organizar e homogeneizar a classificação todos os materiais utilizados na construção, mais especificamente a pedra natural e o todos os produtos que resultem da sua transformação (“<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137387835/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>,” 2005).

Os produtos de rocha utilizados na construção civil estão divididos em três grupos principais: produtos em forma de placa; produtos em pedra maciça e produtos especiais em pedra. Quanto mais e melhor estiver caracterizado um material, mais facilmente será também identificada a forma correta de o aplicar em obra, o que por si só representa uma mais valia (“<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137387835/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>,” 2005).

A cada um dos produtos de pedra utilizados na construção sejam em placa, em pedra maciça ou produtos especiais, está associada uma norma. Em seguida apresentam-se alguns exemplos (Velho & Castro, 2004):

1. NP EN 1341:2004 Lajes de pedra natural para pavimentos exteriores. Requisitos e métodos de ensaio.
2. NP EN 1342:2004 Cubos e paralelepípedos de pedra natural para pavimentos exteriores. Requisitos e métodos de ensaio.
3. NP EN 1343:2005 Guias de pedra natural para pavimentos exteriores. Requisitos e métodos de ensaio.
4. NP EN 12326-1:2005 Ardósias e produtos em pedra para coberturas descontínuas e revestimentos de paredes Parte 1: Especificações dos produtos (Maio de 2006).
5. EN 1469: Placas em pedra natural para revestimentos (Setembro de 2006).
6. EN 12057: Ladrilhos em pedra natural (Setembro de 2006).
7. EN 12058: Placas em pedra natural para pavimentos e escadas (Setembro de 2006).

3.3.2 Certificação Europeia

No que diz respeito ao caso particular da pedra natural, como para outros materiais, com vista a obter certificado de conformidade está sujeita ao cumprimento das especificações técnicas referidas na Diretiva dos Produtos de Construção (Diretiva 89/106/CEE, 1989).

O processo de certificação da conformidade de um determinado material tem associada a escolha de métodos de controlo da conformidade. Os métodos a utilizar dependem dos requisitos existentes inerentes ao produto que se pretende certificar. Tendo isto em consideração, os métodos de controlo de conformidade são (Castro, 2006):

- a) Ensaio inicial do produto feito pelo fabricante ou por um organismo aprovado;
- b) Ensaaios de amostras colhidas em fábrica de acordo com um programa de ensaios previamente estabelecido, efetuados pelo fabricante ou por um organismo aprovado;
- c) Ensaio aleatório de amostras colhidas na fábrica, no mercado ou numa obra, efetuado pelo fabricante ou por um organismo aprovado;
- d) Ensaio de amostras colhidas num lote destinado a fornecimento ou já fornecido, efetuado pelo fabricante ou por um organismo aprovado;
- e) Controlo de produção da fábrica;
- f) Inspeção inicial em fábrica e do controlo de produção em fábrica efetuada por um organismo aprovado;
- g) Fiscalização, avaliação e apreciação contínuas do controlo de produção em fábrica, efetuadas por um organismo aprovado.

Depois do produto ser avaliado e caracterizado, devem ser elaboradas declarações de conformidade. Estas declarações são da responsabilidade de cada produtor, uma vez que estas vêm garantir aos seus clientes que estão a adquirir um produto cumpridor de todas as exigências previstas na respetiva norma harmonizada.

A declaração de conformidade inclui várias informações, como por exemplo: nome do produtor, morada, data em que o produto foi transformado, norma EN de referência para o produto, nome do produto de acordo com a respetiva norma, nome típico da pedra, local de origem, características essenciais, etc.

Em seguida apresenta-se um exemplar de uma declaração de conformidade. Neste caso, e apenas a título de exemplo, uma declaração de conformidade para lajes de pedra natural para pavimento exterior

(“<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137387835/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>,” 2005).


	
0123	
Qualquer Empresa, Lda., Apartado 21, 1000-000 LISBOA	
01	
0123-CPD-001	
EN 1341:2001	
Lajes de pedra natural destinadas à circulação de peões e de veículos	
Resistência à flexão:	3,6 MPa
Resistência à flexão:	3,2 MPa
(após ensaio de gelo/degelo)	
Resistência ao escorregamento:	45
Resistência à derrapagem:	45
Resistência ao desgaste por abrasão:	NPD

Figura 14 - Exemplo de uma declaração de conformidade para lajes de pedra natural (“<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137387835/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>,” 2005).

CAPÍTULO 4

Principais casos de degradação em revestimentos exteriores e métodos de conservação

Casos de degradação em revestimentos exteriores e
métodos de conservação

Casos de degradação de outra natureza
Métodos de conservação

4 PRINCIPAIS CASOS DE DEGRADAÇÃO EM REVESTIMENTOS EXTERIORES E MÉTODOS DE CONSERVAÇÃO

Os revestimentos das superfícies de edifícios são elementos construtivos que, além de proteger o património edificado, o valorizam, por serem a face mais visível do edificado. Mais especificamente, o revestimento em pedra natural (RPN) está associado no mercado da construção a um material de revestimento versátil, sendo um produto natural nobre de elevada qualidade e uma boa solução técnica e estética. Esta solução oferece às superfícies em que é aplicada características de isolamento, resistência, durabilidade, higiene e ampla riqueza estética. (Neto & Brito, 2011)

Em fase de projeto, a seleção de um tipo de pedra, o seu acabamento e a sua aplicação deve ter em conta as propriedades físicas e mecânicas apropriadas à utilização pretendida, à tecnologia disponível, ao meio ambiente em que será inserida e à vida útil prevista (Neto & Brito, 2011).

A aplicação rigorosa do revestimento e uma manutenção cuidada são igualmente importantes para obter um bom desempenho deste tipo de revestimento. De facto, antes de proceder a trabalhos de conservação e manutenção, é aconselhável caracterizar os materiais a utilizar na pedra, já que a utilização de produtos inadequados poderá ativar mecanismos de degradação indesejáveis da pedra (Neto & Brito, 2011).

Apesar do rápido crescimento do conhecimento científico e tecnológico, assiste-se frequentemente ao aparecimento precoce de anomalias, comprometendo as suas funções de revestimento e podendo inclusivamente pôr em causa a segurança de pessoas e bens. O condicionamento do desempenho deste tipo de revestimentos decorre muitas vezes da não observância de critérios de seleção, controlo e conhecimento dos materiais, sendo estes facilmente relegados relativamente a prazos ou fatores económicos (Neto & Brito, 2011).

A reparação destas situações anómalas acarreta frequentemente riscos e elevados custos, como é largamente documentado por diversos autores (Neto & Brito, 2011).

A pedra natural um dos materiais mais antigos usados na construção, sendo visto como um material nobre e durável, com elevado potencial estético, pois apresenta uma enorme variedade de cores e texturas (A. Silva, 2009).

Tal como qualquer outro material, durante a sua vida útil, a pedra natural está sujeita a várias solicitações que provocam a alteração das suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. As pedras naturais apresentam grande variabilidade de características dentro do mesmo tipo de pedra, o que constitui um fator favorável á degradação do revestimento. A água, as ações humanas e ambientais constituem também fatores de degradação, sendo a poluição um fator cada vez mais importante (A. Silva, 2009).

As anomalias que se podem identificar em revestimentos de pedra são dos mais variados de tipos, em seguida apresentam-se os mais correntes (A. Silva, 2009).

4.1 Casos de degradação resultantes da ação direta das condições climáticas

4.1.1 Eflorescências / Criptoflorescências

As eflorescências caracterizam-se pela cristalização de sais á superfície da pedra natural, causando manchas com consistência pulverulenta, que produzem um efeito estético indesejável e que ao longo do tempo poderão influenciar as características de durabilidade do revestimento.

As eflorescências surgem devido á dissolução de sais solúveis em água, tendo esta origem na humidade existente no suporte, devida a humidades ascensionais (existentes por exemplo nas colas usadas na colagem de placas pétreas) ou a águas que aí penetram provenientes do exterior. Quando essa água ascende á superfície, vai evaporar, originando a deposição dos sais que transportava, cristalizando estes á superfície. Os sais podem provir dos materiais de colagem ou selagem (no caso de fixação direta) ou podem estar depositados no suporte (A. Silva, 2009).

As manchas provocadas pelas eflorescências podem ter diversas cores consoante os sais presentes, sendo as manchas brancas as mais comuns. As eflorescências que provocam manchas brancas podem ser de dois tipos: eflorescências de cal e eflorescências de silicato

causadas por reações de silicatos alcalinos. Estes dois tipos distinguem-se através da limpeza das manchas brancas com um produto ácido; no caso de não se verificar qualquer reação, trata-se de eflorescências de silicato (A. Silva, 2009).

A eliminação desta anomalia pode ser realizada através da limpeza e manutenção das fachadas, podendo acarretar elevados custos.

As criptoflorescências são anomalias em tudo semelhante às eflorescências, que se verificam quando a cristalização de sais se dá abaixo da superfície do revestimento (entre a parede e o revestimento).

Esta anomalia provoca, geralmente, o empolamento do revestimento, sendo esta verificada no caso de fixação direta dos elementos de pedra natural ao paramento.

4.1.2 Manchas localizadas, sujidade superficial e alteração cromática

As manchas existentes no revestimento (figura seguinte) são anomalias que alteram o seu aspeto, através da alteração da textura e cor do mesmo, podendo ter várias causas. Podem ser manchas de humidade, de poluição, podem ser devidas a utilização inadequada de um tipo de pedra natural ou aos materiais utilizados na colagem das placas pétreas. Outra situação que origina a degradação visual do revestimento é a colagem de cartazes e autocolantes (A. Silva, 2009).

Certos acabamentos superficiais da pedra natural favorecem a retenção de poeiras e sujidades, como é o caso do acabamento rugoso. Essa retenção propicia a degradação estética do revestimento.

No caso das manchas de humidade, estas são mais recorrentes em fachadas expostas á ação da chuva aliada a ventos fortes. A fissuração do revestimento é outro dos fatores condicionantes para a infiltração de água, assim como as propriedades intrínsecas dos elementos pétreos usados no revestimento que propiciam a absorção de água, como é o caso da sua porosidade (A. Silva, 2009).

As manchas devidas a alterações cromáticas são devidas essencialmente ao envelhecimento natural da própria pedra, assim como a fenómenos de ordem química. Estas alterações de cor não constituem apenas um problema estético, pois debaixo destas manchas ocorrem reações químicas que favorecem a degradação da pedra natural.



Figura 15 - Anomalias estéticas – eflorescências e manchas localizadas (devido ao material de colagem e devido à humidade ascensional) (A. Silva, 2009)

4.2 Casos de degradação de outra natureza

4.2.1 Graffiti

Os graffiti são uma anomalia estética devida a ações de vandalismo, que se caracteriza pela pintura da pedra natural com recurso a tintas em spray. Sendo a pedra natural um material poroso, a remoção dos graffiti nem sempre é fácil, sendo por vezes necessário remover a camada superficial da pedra natural. Esta remoção pode contribuir para a ocorrência de novos mecanismos de degradação, devido à diminuição da espessura da placa pétrea.



Figura 16 - Anomalias estéticas – sujidade superficial e graffiti (A. Silva, 2009)

4.2.2 Contaminação biológica

A contaminação biológica da pedra natural provoca a degradação da pedra natural através de processos químicos e é provocada por organismos de origem vegetal ou animal (como se pode verificar na tabela seguinte). Esta contaminação pode dever-se a colonização biológica (algas, líquenes e musgo), a vegetação (que nasce nas juntas e fendas do revestimento) e a excrementos de animais (nocivos para a pedra natural) (A. Silva, 2009).

Microorganismos	Produtos de metabolismo	Efeitos na pedra
Bactérias autotróficas	Ácidos inorgânicos	Dissolução
Bactérias heterotróficas	Ácidos orgânicos	Dissolução Formação de <i>pátina</i>
Fungos	Ácidos orgânicos	Deterioração mecânica e química Retenção de água
Algas e cianobactérias	Ácidos orgânicos ou compostos quelantes	Favorecimento do crescimento de seres heterotróficos Dissolução de minerais Formação de <i>pátina</i> e películas de cores diversas
Líquenes	Ácidos orgânicos, sobretudo ácido oxálico	Deterioração física e química Aumento de porosidade

Figura 17 - Principais microorganismos responsáveis por biodeterioração na pedra natural (A. Silva, 2009)

4.2.3 Vegetação parasitária

Algumas aves transportam terra e sementes que depositam no revestimento propiciando assim o crescimento de vegetação parasitária. Esta surge, regra geral, nas juntas entre placas pétreas ou nas fissuras existentes. A vegetação parasitária contribui para o acréscimo de tensões, devido às suas raízes, contribuindo para abrir cada vez mais as fissuras, podendo mesmo originar a fracturação da placa pétrea (A. Silva, 2009)



Figura 18 - Vegetação parasitária existente entre duas placas pétreas e colonização biológica (A. Silva, 2009)

4.2.4 Deficiências de planeza

Entendem-se por deficiências de planeza os casos em que os elementos pétreos do revestimento se encontram colocados de forma irregular. Esta anomalia propicia, no caso de revestimentos com juntas abertas, a infiltração de água, facilitando assim a ocorrência de outras anomalias (A. Silva, 2009).



Figura 19 - Deficiências de planeza do revestimento (A. Silva, 2009).

4.2.5 Deterioração das juntas

A deterioração das juntas, como se verifica na figura seguinte, ocorre quando o material de preenchimento fica fissurado, podendo mesmo ocorrer a perda de material de colmatação. Esta anomalia implica a perda de funcionalidade das juntas, que é impedir a infiltração de água e absorver as deformações do revestimento, proporcionando assim a ocorrência de outras anomalias, tais como descolamentos, eflorescências / criptoflorescências, alteração de cor, colonização biológica e fissuração (A. Silva, 2009).

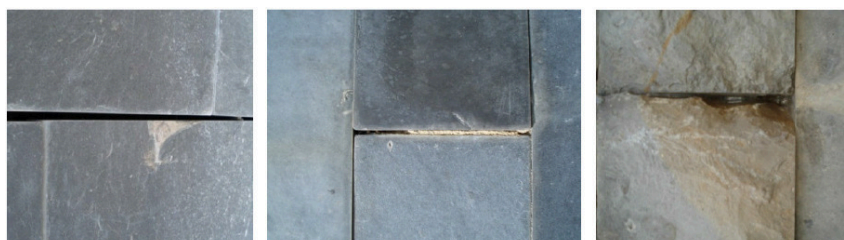


Figura 20 - Falta de linearidade da junta entre placas pétreas, perda de material de colmatação das juntas e lascagem do material pétreo na proximidade da junta (A. Silva, 2009).

4.2.6 Perda de integridade

Em relação á perda de integridade importa especificar dois casos particulares: a fissuração e a degradação do material.

4.2.6.1 *Fracturação / Fissuração*

A fracturação e a fissuração, como se pode ver na figura seguinte, caracterizam-se por aberturas nas placas pétreas de revestimento, no entanto, são anomalias distintas. A fissuração dá-se a nível superficial, podendo ser fina, distribuindo-se por todo o revestimento sem orientação o preferencial ou podendo ser de largura significativa. A fracturação dá-se a

toda a profundidade do revestimento, originando em alguns casos a separação do elemento pétreo causando o seu afastamento, criando assim o risco de desprendimento do suporte. No entanto, a fracturação não implica a perda de material pétreo, como acontece com a lascagem (A. Silva, 2009).

Estas anomalias são devidas a ações mecânicas, a defeitos do elemento pétreo ou a erros de execução. As ações mecânicas caracterizam-se essencialmente por choques (acidentais ou vandalismo) e por deformações do suporte quer seja por flexão, quer seja por retração devido a alterações do teor em água, quer seja por dilatação devida a variações de temperatura ou a assentamento do suporte.



Figura 21 – Fracturação e fissuração da placa pétrea (A. Silva, 2009)

4.2.6.2 Degradação do material

Considera-se que a alveolização, a picadura, a escamação, a esfoliação, a placa e plaqueta, a erosão, a esfoliação e a pulverização são anomalias que provocam a degradação da pedra natural (Figura seguinte), assumindo maior ou menor gravidade consoante a espessura afetada da pedra.

Qualquer destas anomalias está associada a perda de material pétreo. A alveolização é um tipo de degradação do material que se caracteriza pela formação de cavidades (alvéolos) na superfície pétrea. A picadura é semelhante á alveolização, mas as cavidades formadas têm dimensões inferiores (A. Silva, 2009).

A escamação do revestimento de pedra natural caracteriza-se pelo destacamento de pequenas porções (escamas) dos elementos de pedra natural. A esfoliação, por sua vez, caracteriza-se pela divisão da pedra natural em lâminas. A placa e plaqueta são como o destaque de fragmentos achatados paralelos á superfície. A espessura desses fragmentos é superior a meio milímetro no caso da placa e inferior a meio milímetro no caso da plaqueta (A. Silva, 2009).

Designam-se por pulverização os casos em que a superfície da pedra natural perde coesão, ocorrendo a perda de material em forma de pó.



Figura 22 - Degradação do material: erosão, esfoliação e alveolização (A. Silva, 2009)

A erosão ou desgaste pode dever-se ao impacto de partículas em suspensão no ar, que deste modo destroem a camada superficial e alteram o acabamento da pedra natural. Frequentemente, a erosão dá-se de forma distinta nas diferentes zonas do revestimento, designando-se então por erosão diferencial.

Alguns tipos de pedra não devem ser utilizados em determinados ambientes ou até mesmo no exterior, pois, devido à sua constituição, assumem um comportamento que as deixa desfiguradas. É o caso dos calcários que, quando exposto a chuvas ácidas (com presença de dióxido de enxofre), vão sofrer erosão por dissolução (A. Silva, 2009).

4.2.7 Anomalias na fixação ao suporte

A fixação ao suporte dos revestimentos de pedra natural deverá ser garantida durante o seu tempo de vida útil. O desprendimento de uma placa de pedra natural poderá provocar danos graves em pessoas e bens. A degradação das fixações e o descolamento constituem a principal causa de queda de placas pétreas do revestimento.

4.2.7.1 Degradação das fixações

Quando se opta, por diversos motivos, por fixação indireta das placas pétreas com recurso a fixações metálicas, se necessário ter cuidado para evitar o risco de corrosão bimetalica. No caso, por exemplo, dos gatos de aço inox, é indispensável que se evite a formação de um par galvânico forte (segundo o documento homologado LNEC DH 864 de 2007). Este par galvânico forte forma-se através do contacto entre o aço inoxidável e materiais como o aço macio, ferro fundido, alumínio e zinco (A. Silva, 2009).

Outros fatores preponderantes na corrosão dos elementos metálicos são o contacto com a água e a poluição. As fixações, ao degradarem-se, vão originar manchas ferruginosas na pedra natural, podendo ainda originar a sua fissuração e desagregação. Os elementos de fixação podem ainda fletir originando deficiências de planeza do revestimento, que poderão dar origem a fissuração, lascagem ou até mesmo ao desprendimento de placas pétreas.

4.2.7.2 Descolamento

Esta anomalia é caracterizada pelo destacamento de elementos do revestimento, que pode dar-se entre o material de assentamento e suporte ou entre o material de assentamento e a placa de pedra natural.

Uma das principais causas desta anomalia é a má aderência do revestimento ao suporte, quer pela utilização incorreta do sistema de fixação, quer pela incorreta preparação do suporte ou pela má execução do revestimento, ou seja, erros de aplicação. Outra das causas por que se verificam descolamentos é o empolamento da placa pétrea devido a criptoflorescências (A. Silva, 2009).



Figura 23 - Dois casos de perda de um elemento pétreo no revestimento e flexão do elemento de fixação (A. Silva, 2009).

4.2.8 Lacuna parcial e lascagem do elemento pétreo

A lacuna parcial do elemento pétreo caracteriza-se pela perda de material, devida essencialmente a ações mecânicas, tais como: choques acidentais ou vandalismo. Esta anomalia é mais recorrente em zonas do revestimento mais perto do solo. A lascagem do elemento pétreo distingue-se pela perda de fragmentos de material pétreo. Esta anomalia é mais comum na zona das fixações metálicas e nos bordos das placas pétreas (A. Silva, 2009).



Figura 24 - Lacuna e lascagem do elemento pétreo na zona das fixações metálicas (A. Silva, 2009)

4.3 Métodos de conservação

Os tratamentos de conservação mais usuais em elementos de pedra são: a dessalinização, a consolidação, a hidrofugação e consolidação – hidrofugação (Costa et al., 2012).

4.3.1 Dessalinização

Este procedimento tem por objetivo extrair minerais de sais solúveis. Uma vez que se tenha conhecimento destes, da sua origem e se tenha eliminado os processos que motivaram o seu aparecimento, pode-se então dar início ao processo de dessalinização que consiste na aplicação de dispositivos absorventes, durante um determinado período de tempo, sobre as superfícies das fachadas que necessitam de tratamento. São então utilizados vários compostos, tais como: pastas gelatinosas, produtos dessulfurantes, pastas inertes de argila e pensos de celulose (Costa et al., 2012).

- **Pastas gelatinosas:** a sua constituição é á base de sais solúveis com ação absorvente.
- **Produtos dessulfurantes:** são aplicados sob a forma de emplastos ou são sustentados por telas ou papel que desagregam as formações de gesso (crostas negras ou eflorescências compactas).
- **Pastas inertes de argila:** constituídas por sepiolite, caulinite e atapulgite. Normalmente possuem cerca de dois a três centímetros de espessura.
- **Pensos de celulose:** protegidos por uma lâmina de polietileno que evita a evaporação.

A eficácia de cada um dos métodos de dessalinização, referidos anteriormente, está dependente do mineral ou minerais de sais solúveis presentes na pedra, do seu tipo e da sua solubilidade. A eficácia está ainda dependente da espessura da zona afetada por esses

minerais e do tipo de pedra a dessalinizar, nomeadamente no que diz respeito às características da sua rede porosa (porosidade livre ou aberta, porometria, rapidez da transferência por capilaridade da água e velocidade de evaporação).

Regra geral, estes processos (de dessalinização), além de serem morosos têm também uma atuação na pedra que se resume a aproximadamente dois a cinco centímetros de espessura, não tendo por isso grande nível de eficácia, tendo em conta que em muitos casos as pedras aplicadas em fachadas atingem as dezenas de centímetros de espessura (Costa et al., 2012).

4.3.2 Consolidação

Este procedimento tem como objetivo cimentar as superfícies onde a coesão da rocha é fraca ou quase inexistente, ou seja, aquelas pedras que tenham sido afetadas por desagregação granular e, aquelas onde após o tratamento com produtos biocidas se verifica a queda abundante de material pétreo provocada pela ação da colonização biológica. A consolidação deve manter o aspeto exterior da pedra e, devido à diminuição da porosidade, aumentar a resistência garantindo assim um melhor comportamento face a ataques posteriores (Costa et al., 2012).

Em todo o processo são utilizados produtos orgânicos e inorgânicos que preenchem parcialmente os poros e fissuras da pedra com cargas inertes que aderem às zonas não deterioradas. Os produtos utilizados na consolidação deverão ter as seguintes características: facilidade de aplicação, penetrabilidade, durabilidade e de preferência não devem reduzir a permeabilidade.

- **Produtos orgânicos:** são elásticos, aderentes e de poro aberto. Contudo as suas propriedades são diferentes das do suporte pétreo, mudando de tonalidade e acabando por se degradar com o tempo. Fenómeno este que ocorreu em Portugal na década de oitenta no século XX. Na altura foi aplicado um consolidante orgânico (silicone) nos portais de diversos monumentos graníticos que, por ação direta da luz solar, alterou a sua cor adquirindo assim uma tonalidade alaranjada às pedras que ainda hoje se mantêm e que diferem muito do tom acinzentado das restantes pedras graníticas onde o mesmo produto não foi aplicado. Como exemplos desta situação temos o Mosteiro de Paço de Sousa e a igreja de São Pedro de Rates. Alguns exemplos de materiais

que provocam este efeito são: os silicones, as resinas epoxídicas, acrílicas, de poliéster e de poliuretano, ou seja, as mais penetrantes e que endurecem com a água.

- **Produtos inorgânicos:** possuem natureza semelhante á das rochas e são mais duráveis que os produtos orgânicos, pelo facto de serem irreversíveis e imunes á luz solar. São, no entanto, mais frágeis e menos elásticos que os consolidantes orgânicos. A título de exemplo referem-se os ortossilicatos de etilo e os fluossilicatos.

Na atualidade, o consolidante mais utilizado nas pedras graníticas e com resultados considerados como satisfatórios tem na sua constituição ortossilicato de tetraetilo, que se encontra disponível em várias marcas presentes no mercado (Costa et al., 2012).

No que diz respeito à aplicação do consolidante, deverá ser sempre feita por um técnico de restauro com experiência. Tendo em conta a presença de quantidades substanciais de minerais de sais solúveis, não visíveis macroscopicamente em pedras afetadas por desagregação e em virtude de estes minerais cristalizarem no interior da rede porosa da pedra, há uma diminuição da eficácia destes produtos. Por isto é recomendado que se façam aplicações experimentais do consolidante no local.

Ainda em relação à aplicação, o produto deverá ser aplicado até recusa aparente para que assim se garanta uma profundidade de penetração o maior possível, seguindo sempre as indicações do fabricante. É boa prática que se certifique que as pedras se encontram limpas e secas, uma vez que o produto não deverá ser aplicado em superfícies húmidas. Depois da aplicação, decorre um tempo de cura mínimo de três semanas, pelo que as superfícies consolidadas deverão se manter secas e protegidas da chuva durante este intervalo de tempo (Costa et al., 2012).

4.3.3 Hidrofugação

O objetivo de um hidrófugo é limitar ou mesmo impossibilitar a entrada de água. A diminuição da quantidade de água que entra nas pedras aumenta em muito a durabilidade, visto que diminui as probabilidades de ocorrência de gelividade, do número de ciclos de cristalização e dissolução dos minerais de sais solúveis e do desenvolvimento de seres vivos. A durabilidade do produto é proporcional á penetração do produto. Há que ter atenção às características possuídas pelo hidrófugo, como por exemplo: ser incolor, não deve mudar de

cor por reação com os raios ultravioletas da radiação solar e por fim, devem permitir que as pedras transpirem (Costa et al., 2012).

Em relação à aplicação, estes são aplicados com uma brocha ou trincha, pistola aspersor ou spray. Assim que estejam polimerizados e secos, acabam por repelir a água devido ao aumento do ângulo de contacto entre a gota e o paramento, produzindo assim um efeito designado por efeito de pérola.

São produtos hidrófugo, os seguintes: polisiloxanos, silicones com solvente orgânico, silicones em solução aquosa e estearatos de alumínio, zinco e cálcio.

Tendo em conta que a eficácia de um produto biocida, regra geral, não resiste após o Inverno que se segue à aplicação desse produto, principalmente em zonas de fachada propensas ao desenvolvimento de plantas, nomeadamente fachadas orientadas a Norte, aconselha-se então, como medida preventiva do novo desenvolvimento de algas, musgos e líquenes, a aplicação de um produto hidrófugo após o período de cura do biocida (Costa et al., 2012).

É de extrema importância que se tenha atenção a aplicação do hidrófugo nas cornijas das fachadas, para que assim se possa evitar a entrada e passagem de água por capilaridade através das pedras. Por outro lado, a redução da entrada de água por capilaridade após a aplicação de um consolidante não impede a entrada das águas da chuva, não diminuindo, assim, de forma significativa o avanço dos processos de deterioração da pedra. Face a este tipo de situação, recomenda-se a aplicação de um produto hidrófugo após o período de cura do consolidante.

O período de eficácia de um hidrófugo não é, regra geral, muito longo, por isso é vital que se repita a sua aplicação com certa periodicidade (Costa et al., 2012).

Na atualidade os produtos hidrófugos mais utilizados em pedras, nomeadamente de granito, são à base de polisiloxanos. Recomenda-se também que a sua aplicação seja levada a cabo por um técnico especializado e sempre de acordo com as indicações do fabricante.

4.3.4 Consolidação - Hidrofugação

Os objetivos de um consolidante-hidrófugo são, conforme espectável, cimentar as superfícies atingidas por desagregação granular e diminuir a entrada de água. Existem

produtos que verificam simultaneamente as duas funções, dado que ao preencherem os poros funcionam como hidrofugantes. Ainda assim é preferível que se utilize produtos específicos para cada uma das funções. Em termos de aplicação, seria aplicado em primeiro lugar o consolidante e, seguidamente ao período de cura, o hidrófugo (Costa et al., 2012).

CAPÍTULO 5

Trabalho Laboratorial

Identificação do material estudado

Caracterização física e mecânica das rochas

Ensaio de envelhecimento artificial acelerado

Determinação da resistência mecânica

5 TRABALHO LABORATORIAL

5.1 Identificação do material em estudo

O material estudado foi recolhido numa pedreira (Fábrica Extração de Pedra e Brita Palmeira Lda.) em Câmara de Lobos na Região Autónoma da Madeira. No terceiro capítulo desta dissertação indicam-se seis tipos de rocha ornamental que são frequentemente aplicados nas construções na Região Autónoma da Madeira, no entanto só foi possível proceder á recolha de cinco desses tipos de rocha. Foi, portanto, sobre estes que incidiu todo o estudo.

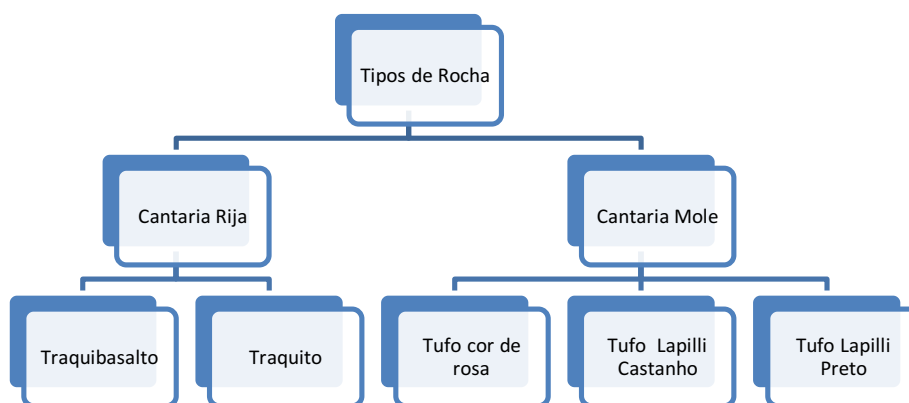


Figura 25 - Tipos de rocha estudados.

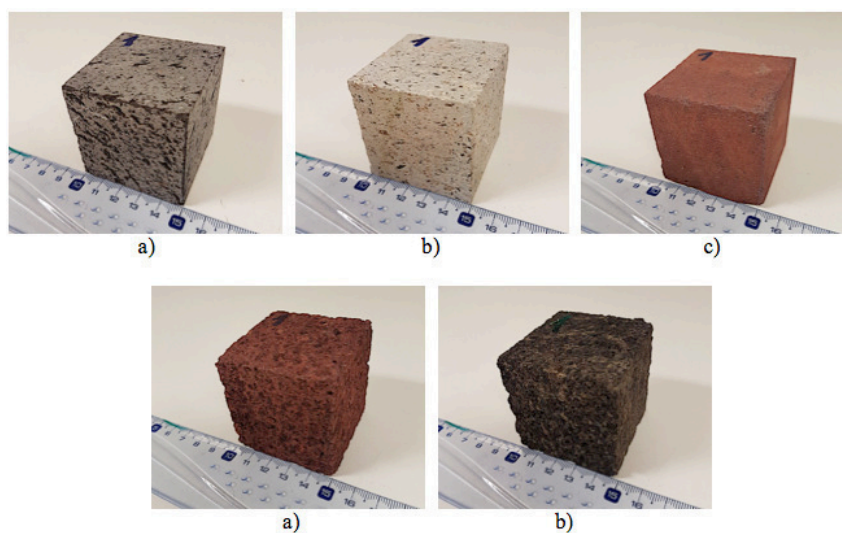


Figura 26 - Estado inicial dos provetes, antes de serem submetidos a envelhecimento, sendo: a) Traquibasalto; b) Traquito; c) Tufo (cor de rosa); d) Tufo Lapilli Castanho; e) Tufo Lapilli Preto.

5.2 Caracterização física e mecânica das rochas

5.2.1 Parâmetros de caracterização

5.2.1.1 Método do cesto de rede metálica

Este método é normalmente utilizado com partículas em que a sua dimensão varie entre 31,5 mm e 63 mm. Os provetes utilizados são cubos com secção aproximada de 50 mm x 50 mm. O procedimento para realização deste método é, segundo a norma NP EN 1097-6:2003, o seguinte (IPQ, 2004):

- 1) Colocar o provete no cesto de rede metálica e imergi-lo completamente no tanque com água à temperatura de (22 ± 3) °C, com uma altura de água de pelo menos 50 mm acima do topo do cesto;
- 2) Deixar o cesto com o agregado permanecer completamente imerso na água a (22 ± 3) °C durante um período de $(24\pm0,5)$ h;
- 3) Agitar o cesto com o provete e pesá-lo na água a uma temperatura de (22 ± 3) °C (M2);
- 4) Retirar da água o cesto com o provete e deixar escorrer alguns minutos. Verter cuidadosamente o provete do cesto sobre um dos panos secos. Voltar a colocar o cesto vazio na água, agitá-lo 25 vezes e pesá-lo imerso em água (M3);
- 5) Secar cuidadosamente a superfície do provete até que desapareçam todas as películas visíveis de água, mas o provete apresente ainda um aspeto húmido. Efetuar a pesagem do provete (M1);
- 6) Transferir o provete para um tabuleiro e colocar na estufa a uma temperatura de (110 ± 5) °C e deixar secar até massa constante. As pesagens deverão ser registadas com uma exatidão igual ou superior a 0,1% da massa do provete (M4).



Figura 27 - Exemplo do equipamento utilizado na realização do método do cesto de rede metálica.

5.2.1.2 *Massa volúmica*

A fórmula utilizada na determinação da massa volúmica foi a seguinte:

$$\rho_{rd} = \frac{M4}{\frac{M1 - (M2 - M3)}{\rho_w}} \quad (1)$$

Onde,

ρ_{rd} – massa volúmica dos provetes [Mg/m³];

M1 - massa do provete saturado com superfície seca ao ar [g];

M2 - massa aparente do cesto contendo o provete de agregado saturado, imersos em água [g];

M3 - massa aparente do cesto vazio imerso em água [g];

M4 - massa do provete seco em estufa [g];

ρ_w - massa volúmica da água, considerando que se encontra a uma temperatura de 18 °C [Mg/m³].

5.2.1.3 *Absorção de água*

A fórmula utilizada na determinação da absorção de água foi a seguinte:

$$WA_{24} = \frac{(M1 - M4)}{M4} \times 100 \quad (2)$$

Onde,

WA₂₄ – absorção de água [%];

M1 - massa do provete saturado com superfície seca ao ar [g];

M4 - massa do provete seco em estufa [g].

5.2.1.4 *Porosidade aberta*

A fórmula utilizada na determinação da porosidade foi a seguinte:

$$PA = \frac{(M1 - M4)}{M1 - (M2 - M3)} \times 100 \quad (3)$$

Onde,

M1 - massa do provete saturado com superfície seca ao ar, em gramas;

M2 - massa aparente do cesto contendo o provete de agregado saturado, imersos em água, em gramas;

M3 - massa aparente do cesto vazio imerso em água, em gramas;

M4 - massa do provete seco em estufa, em gramas;

5.2.1.5 Densidade aparente

A fórmula utilizada na determinação da densidade foi a seguinte:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Onde,

m - massa do provete seco [g];

V - volume do provete [cm³].

5.2.2 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi realizado com intuito de perceber com que facilidade os provetes em estudo absorvem água e estabelecer uma comparação, entre os vários tipos de rocha, para verificar como varia o CC (coeficiente de capilaridade).

A metodologia utilizada na realização deste ensaio foi adaptada da EN1015-18 e é a seguinte (Normalização, 2002):

- 1) Colocação dos provetes num tabuleiro com uma altura de água entre 5 a 10 mm, a partir da base do tabuleiro, que se deve manter durante todo o teste (reposição de água à medida que esta vá sendo absorvida pelos provetes). Para evitar que se acumulem bolhas de ar na superfície inferior da amostra sugere-se a colocação de um material que possa reduzir esse efeito. Neste caso utilizou-se um geotêxtil;
- 2) Ativação do cronómetro e assegurar que o nível de água se mantém constante ao longo do procedimento;
- 3) Cobrir o tabuleiro evitando assim que possa ocorrer evaporação dos espécimes molhados;

- 4) A cada interrupção para pesagem e inspeção dos provetes, utilizar um papel ou tecido para retirar água que, entretanto, esteja acumulada na superfície de contacto dos provetes para que desta forma se tenha a superfície molhada, mas sem nada que influencie/aumente o seu peso.

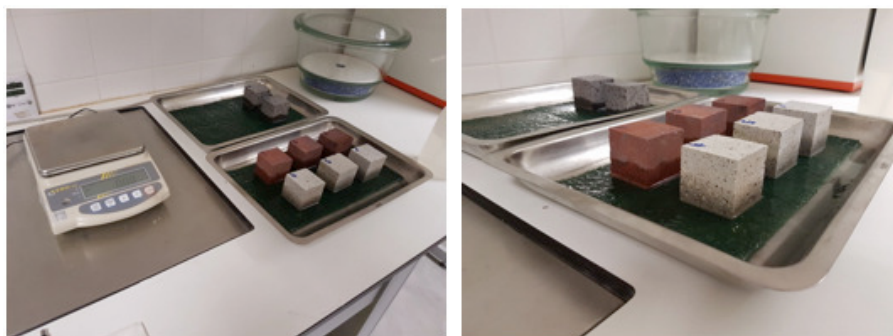


Figura 28 – Ensaio de capilaridade.

O resultado do ensaio de capilaridade foi expresso, para cada provete, de cada tipo de rocha, através de uma curva dependente dos valores de t ($\text{min}^{1/2}$) nas abcissas e M/S (Kg/m^2) nas ordenadas, sendo: t – tempo; M – massa e S – secção.

O coeficiente de capilaridade (CC) expresso em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, corresponde ao declive da recta traduzida pela expressão $y=mx+b$ e é dado, de forma genérica, pela expressão (Velosa, 2006):

$$CC = \frac{(M/S)_{90} - (M/S)_{10}}{\sqrt{90} - \sqrt{10}} \quad (5)$$

5.2.3 Ensaio de Pundit (Ultrassons)

Esta técnica foi realizada de acordo com o procedimento descrito no documento da empresa CNSFARNELL de 2004 e teve como intuito proceder posteriormente á determinação do Módulo de elasticidade. O aparelho para ensaios ultrassónico permite determinar a velocidade de propagação de uma vibração ultrassónica através de sólidos elásticos, medindo o tempo de transmissão que uma vibração leva a percorrer determinada distância (Farnell, 2004).

A velocidade que impulsos ultrassónicos levam a percorrer um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas desse material. A qualidade de alguns materiais está por vezes relacionada com a sua dureza elástica pelo que a medida da velocidade de impulsos

ultrassónicos em tais materiais pode ser usada para indicar a sua qualidade, assim como para determinar as suas propriedades elásticas (Farnell, 2004);(Bieniawski, Franklin, Bernede, Duffaut, & F., 1978).

O aparelho gera um impulso ultrassónico e mede o tempo de transmissão, t , através do material a testar. A distância, d , que o impulso ultrassónico percorre deve também ser medida para que assim se possa calcular a velocidade.

$$V = \frac{d}{t} \quad (6)$$

Onde,

V – Velocidade de propagação das ondas [Km/s];

d – Distância percorrida pelo impulso ultrassónico (face do provete) [mm];

t – Tempo de transmissão das ondas registado no equipamento [μ s].

A distância, d e o tempo de transmissão, t , foram medidos com uma exatidão de cerca de $\pm 1\%$.

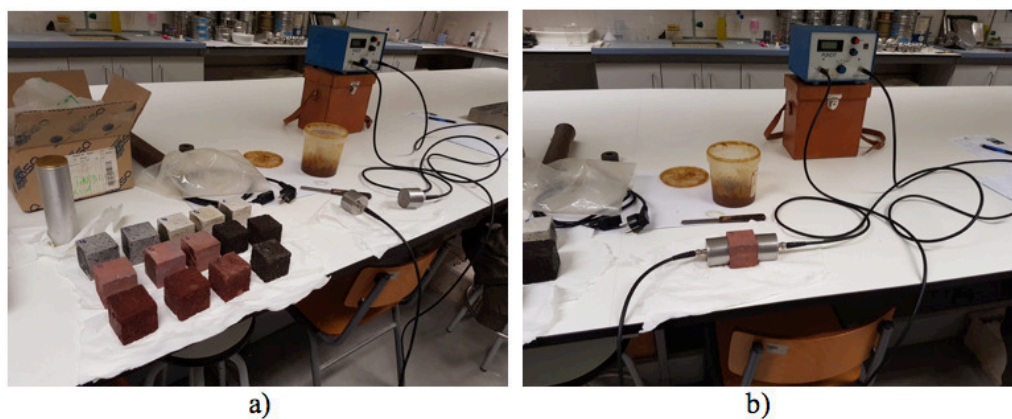


Figura 29 – a) vista geral do equipamento utilizado no teste e amostras de rocha; b) Pormenor ilustrativo da forma como os transdutores devem estar em contacto com a amostra de rocha em análise.

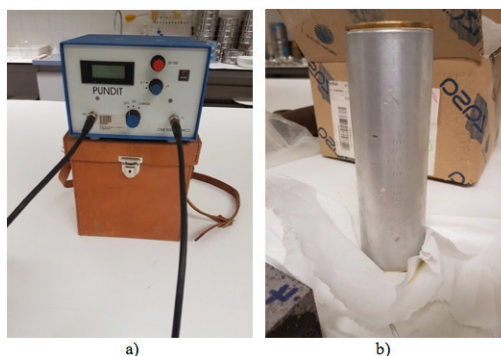


Figura 30 - a) Aparelho para ensaios ultrassónico PUNDIT; b) Barra de calibração.

5.2.4 Determinação do Módulo de Elasticidade

Após a realização do ensaio de Pundit, onde foram determinados os valores da velocidade de propagação, procedeu-se ao cálculo do Módulo de Elasticidade a fim de perceber que diferenças existiam, a este nível, entre os diferentes tipos de rocha em estudo. Para o efeito recorreu-se à equação apresentada em seguida.

$$E_d = \rho \cdot v^2 \cdot \frac{(1 + \delta) \cdot (1 - 2\delta)}{1 - \delta} \quad (7)$$

Onde,

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico [Mpa];

ρ – Densidade real [Kg/m^3];

v – Velocidade [Km/s];

δ - Rácio dinâmico de Poisson = 0.

5.3 Ensaios de envelhecimento artificial acelerado

5.3.1 Ensaio de resistência à cristalização de sais

Este ensaio está regulamentado na norma EN 12370 (*Natural stone test methods – Determination of resistance to salt crystalization*) e tem como objetivo avaliar a resistência à cristalização dos sais nas rochas, analisando a degradação provocada nas amostras sujeitas

a este tipo de envelhecimento. As rochas sujeitas a este tipo de ensaio, deverão ter porosidade aberta superior a 5%. (Carmo, 2012).

O sulfato de sódio, cloreto de sódio, sulfato de cálcio e carbonatos são os sais solúveis que mais estão relacionados com processos de degradação das construções, nomeadamente dos elementos que as constituem. Os sais solúveis quando entram em contacto com água dissolvem-se originando soluções iónicas. Desde que os iões (sulfatos, nitratos, cloretos, sódio, potássio, magnésio e cálcio) estejam em solução não é expectável que causem danos, sendo que contribuem, inevitavelmente, para o aumento da humidade dos materiais em que estejam presentes. Quando ocorre evaporação de água dessas soluções há também um aumento da concentração de iões até que a solução atinja a saturação. Se a evaporação continuar dá-se a re-cristalização dos sais. A cristalização provoca tensões nos poros, quando se dá o crescimento dos cristais formados, aplicando pressão nas paredes dos poros. O processo de cristalização tem implícitos três fatores fundamentais: a existência de humidade e sais solúveis; substrato constituído por um material poroso onde ocorra todo o processo; condições de temperatura e humidade relativa favoráveis (Ferreira, 2013).

O sulfato de sódio é um dos sais mais agressivos na natureza, por esta razão é o mais solicitado na execução de ensaios de envelhecimento acelerado. Este sal pode surgir sob a forma de duas fases estáveis, a ternadite (Na_2SO_4) e a mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), em função da temperatura e da humidade. A ternadite cristaliza diretamente a partir da solução, a temperaturas superiores a 32,4 °C, e a mirabilite cristaliza a temperaturas menores, condicionada pela humidade relativa. A dissolução da ternadite produz uma solução sobressaturada de mirabilite. A cristalização de mirabilite a partir dessa solução implica um grande aumento de volume (superior a 300%), sendo essa a principal razão para a ação destrutiva deste sal. Assim, quanto mais rapidamente a rocha secar, mais facilmente o sulfato de sódio irá cristalizar no seu interior. O grau de saturação da solução e o local de cristalização são os principais fatores que influenciam a degradação provocada por este sal. Os repetidos ciclos de dissolução/cristalização têm consequências quer nas propriedades petrofísicas, como a porosidade, quer nas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, acelerando o processo de deterioração das rochas (Machado, 2012);(Lubelli, 2006);(Katzoff, 2006).

5.3.1.1 Geometria e preparação dos provetes

Para a realização do ensaio, deverá ser tido em conta o seguinte: utilização de, pelo menos, 6 provetes cúbicos de 50mm de lado (as amostras devem ser lavadas de forma a retirar quaisquer partículas e materiais soltos que estejam presos na sua superfície) e colocação na estufa a $105 (\pm) 5$ °C, até se atingir um valor de massa constante. A massa é considerada constante quando a diferença entre duas pesagens sucessivas não for superior a 0,1% da massa inicial do provete, num intervalo de tempo de 24 horas (Carmo, 2012).

A realização do ensaio implica a utilização de uma solução de sulfato de sódio com concentração de 15%, onde os provetes são submersos durante um determinado período de tempo. Em seguida, serão submetidos a secagem, aquecimento e finalmente a arrefecimento à temperatura ambiente. O procedimento comum recomenda a realização de 15 ciclos, salvaguardando, no entanto, o caso em que possa ocorrer a rotura das amostras. Neste caso, as amostras deverão ser lavadas e depois colocadas na estufa até que se obtenha massa constante (Carmo, 2012).

No início e após arrefecimento efetuou-se o registo da massa, bem como registo fotográfico das amostras.

5.3.1.2 Procedimento de ensaio

Na execução deste ensaio serão realizados 15 ciclos, compostos pelas seguintes etapas (Machado, 2012):

1) Imersão – os provetes serão submergidos numa solução de sulfato de sódio (15%), durante 5 horas, à temperatura de 20 °C;

2) Secagem – os provetes deverão ser secos numa estufa, durante 16 horas, à temperatura de 105 °C;

3) Arrefecimento – os provetes serão então deixados a arrefecer, durante 3 horas, à temperatura ambiente.

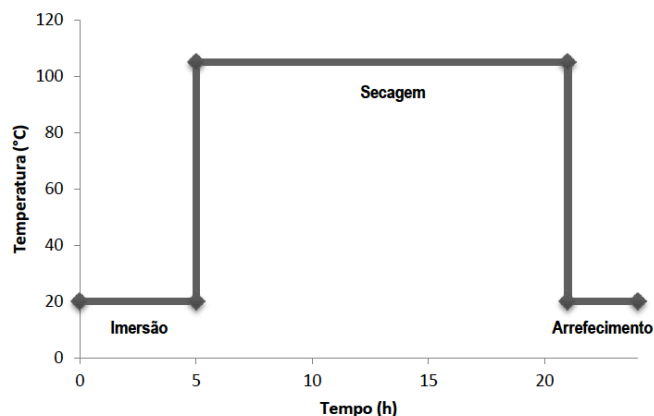


Figura 31 - Ciclo para realização do ensaio de resistência à cristalização de sais (Machado, 2012)

Os cubos serão completamente imersos numa solução de sulfato de sódio decahidratado. O recomendável é que a solução sobreponha as amostras de rocha e esteja entre 2 a 8mm acima, de acordo com o estipulado na norma (EN NP 12370:2001). A imersão deverá decorrer durante aproximadamente cinco horas. É importante que o reservatório utilizado para este efeito esteja fechado, para que assim se evite a evaporação de sais (Carmo, 2012).

Após passarem as cinco horas, deve-se proceder à retirada dos provetes da solução e submete-los a um processo de secagem na estufa á temperatura de 105° C durante aproximadamente 16 horas. Em seguida serão então arrefecidos á temperatura ambiente durante 3h. A partir desta etapa, o processo é repetitivo, devendo ser feito sempre da mesma forma até que se atinja a rotura de algum dos cubos, antes dos 15 ciclos estarem concluídos. Os provetes que apresentem fratura, deverão ser lavados e seguidamente ser colocados na estufa, até que se atinja massa constante (Carmo, 2012).

Posteriormente á conclusão do processo de arrefecimento será feito um registo fotográfico individual, de cada uma das amostras de rocha, para que desta forma se possa registar as alterações que ocorram (Carmo, 2012).

As alterações identificadas na superfície dos cubos estão, normalmente, relacionadas com a alteração de cor, arredondamento das arestas e o aumento do número de fissuras assim como aumento da densidade das fissuras pré-existentes. Como resultado da alteração física, provocado por este ensaio, as rochas atravessam um processo progressivo de perda de coesão e fragmentação. (Machado, 2012).

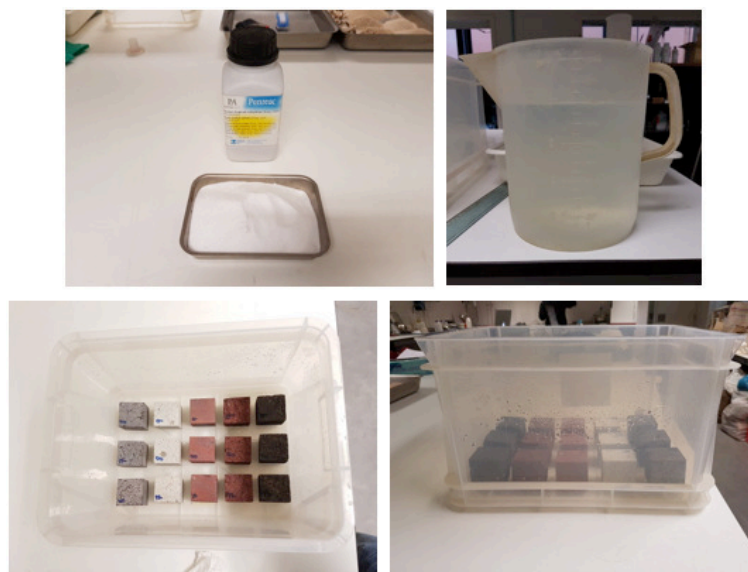


Figura 32 - Material utilizado na realização do ensaio de cristalização de sais.

Durante a realização deste ensaio de envelhecimento os valores de temperatura e humidade relativa registados, no laboratório, foram, respetivamente: 20 °C e 60 %.

A variação de massa (ΔM) foi determinada para cada provete através da equação:

$$\Delta M = \frac{(mf - mi)}{mi} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

ΔM - variação de massa [%];

m_i - massa inicial seca [g];

m_f - massa final seca [g].

5.3.2 Ensaio de resistência ao envelhecimento por variação de temperatura e humidade

Em termos de ensaio de envelhecimento artificial acelerado será realizada uma combinação de ciclos (de verão e inverno), possibilitando assim o estudo do comportamento das amostras de rocha no seu estado inicial e após o envelhecimento (N. Carvalho, 2013).

O ensaio deveria ser calibrado segundo as condições climatéricas típicas da Madeira, local de onde foi extraída a rocha e onde é frequentemente utilizada nas construções, no entanto,

foram utilizados ciclos (de verão e de inverno) previamente definidos e que são normalmente utilizados em ensaios desta natureza. Considerou-se esta opção viável, uma vez que a diferença existente entre os valores de temperatura e humidade dos ciclos empregues no estudo e os valores obtidos das fichas climatológicas da Madeira não é muito significativa, possibilitando assim uma comparação futura com outros trabalhos que venham a ser realizados.

A pretensão, neste ensaio, é simular alterações climáticas, nomeadamente variações de temperatura e humidade relativa de forma a estimar o quanto contribuem para a alteração das amostras, uma vez que condicionam as temperaturas atuantes na superfície exposta da rocha, que são naturalmente superiores às temperaturas ambientais.

5.3.2.1 *Envelhecimento acelerado*

O teste de envelhecimento acelerado foi realizado no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, com recurso a uma câmara de temperatura e humidade *ARL-0680*, utilizando alternância de ciclos de verão e de inverno com variação de temperatura e humidade relativa (RH) (Germinario, Andriani, & Laviano, 2015).



Figura 33 - Câmara de temperatura e humidade ARL-0680 e amostras sujeitas a envelhecimento.

O ciclo de verão tem início aos 20 °C, passando depois para uma alternância de temperaturas entre os 10 °C e os 60 °C. Há em simultâneo a combinação com humidade relativa que se inicia com cerca de 65%, alternando depois entre os 40% e 95 %.

O ciclo de inverno implicou a seguinte variação de temperatura: início aos 20 °C, variando depois entre os -10 °C e 30 °C. Neste ciclo não foi considerada humidade relativa, uma vez

que a temperaturas de 40 °C ou inferiores, a operação contínua é limitada devido à formação de gelo no sistema de arrefecimento e desumidificador (CORP., 2017).

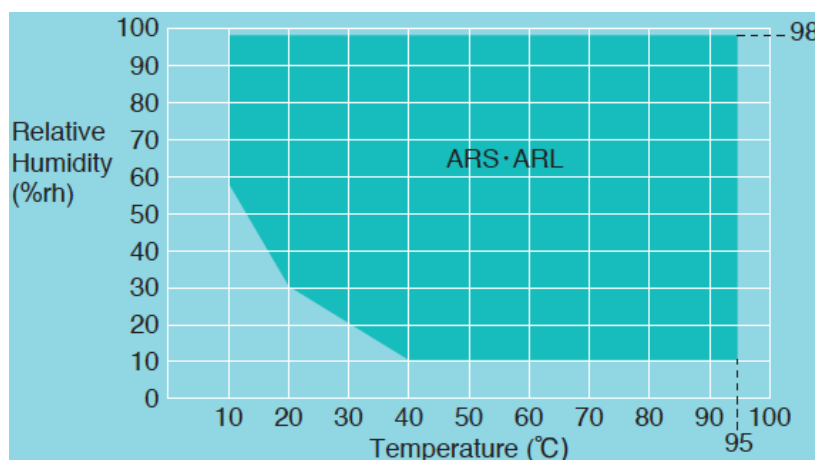


Figura 34 - Gama controlável de temperatura e humidade (CORP., 2017)

Cada ciclo de verão e de inverno teve a duração de 28 h, sendo que entre cada ciclo efetuou-se uma paragem para efetuar a pesagem das amostras, bem como registo fotográfico das mesmas. Os ciclos considerados, para verão e para inverno, são os apresentados na figura seguinte.

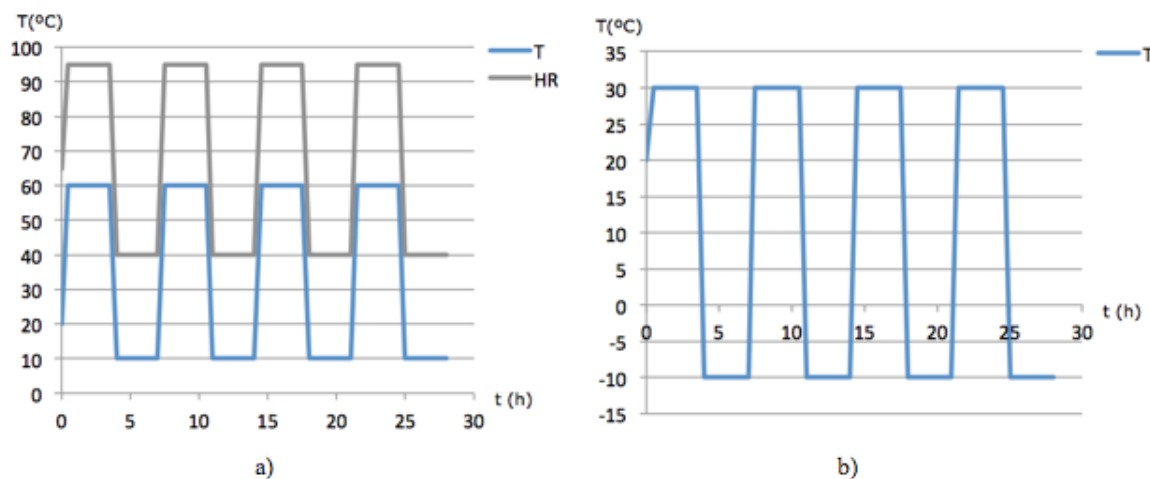


Figura 35 - a) Ciclo de Verão; b) Ciclo de Inverno.

5.3.3 Ensaio de resistência ao envelhecimento por ação do nevocairo salino

A durabilidade dos materiais de construção é uma questão que sempre motivou estudos e investigações por ser um aspeto que se reveste de muita importância, uma vez que faz todo

o sentido que se pretenda que os materiais utilizados tenham a maior longevidade possível. A grande maioria dos problemas que ocorrem em materiais expostos ao ambiente são, em parte, devido ao facto de haver desconhecimento em relação às características dos materiais (físicas, químicas e mecânicas) e ainda a alguma negligência no que diz respeito à influência que as características ambientais impõem sobre os mesmos, nomeadamente aquelas características menos evidentes como é o caso do nevoeiro salino. (Monteiro, 2012)

As condições climáticas variam conforme o local e desempenham um papel importante no que diz respeito à degradação dos materiais. Em zonas litorais, há que ter em conta o fenómeno do nevoeiro salino que inevitavelmente acaba por provocar alterações nos materiais existentes nas construções, nomeadamente, e neste caso em concreto, nos materiais pétreos.

Atualmente, cerca de metade da população mundial vive em zonas litorais, ou mais em concreto, numa faixa litoral com aproximadamente 50 km, por isso é perfeitamente normal que haja uma grande percentagem de construções nestas zonas. Por isto se pode afirmar que ocorre uma grande interação entre o mar e os grandes polos urbanos edificadas (Monteiro, 2012).

Aquilo que está na génese do problema e que importa referir é a composição da água do mar. Esta é obviamente muito rica em sais. Como é possível verificar na figura seguinte, por cada 1000g de água do mar, em média, aproximadamente 35g são sais. No que diz respeito à constituição destes sais é possível encontrar em maior quantidade o ião cloreto (Cl^-) com uma percentagem média de 55% e o ião sódio (Na^+) com percentagem média de 30,6%. Importa ainda dizer que, através de um processo químico, por forças eletrostáticas os iões referidos anteriormente formam o cloreto de sódio (NaCl) (Monteiro, 2012)

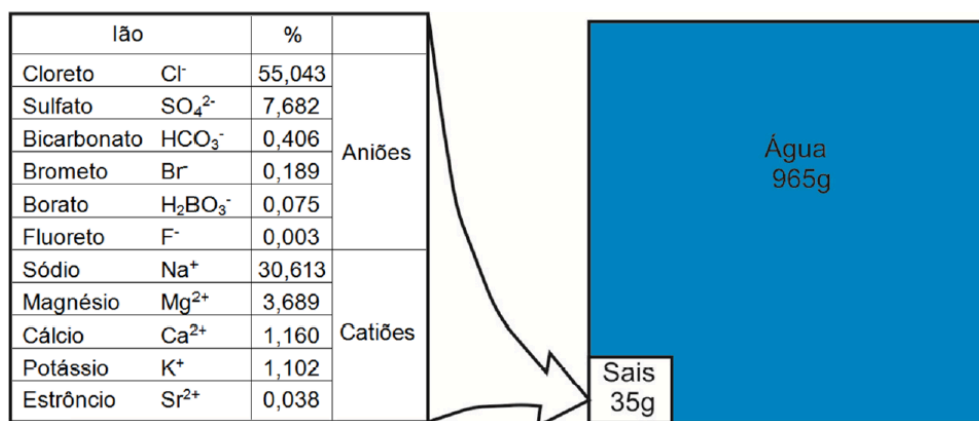


Figura 36 - Percentagem média dos iões presentes nas águas dos oceanos (Monteiro, 2012)

A importância do estudo deste fenómeno, “degradação de materiais pétreos utilizados em construções recentes e no património edificado, quando sujeitos à ação do nevoeiro salino, quer em ambiente costeiro ou em laboratório” está bem patente no facto de se ter assistido a um aumento considerável de investigações nesta área, nas últimas duas décadas. Sendo por isso publicados vários trabalhos que na sua origem têm a mesma motivação, perceber o mecanismo de cristalização do sal e consequentemente os efeitos que daí advém nomeadamente a alteração/degradação dos mais variados tipos de materiais utilizados na construção (Simão, Leal, & Zoghalmi, 2014).

Em termos mais técnicos, e para que se perceba em concreto todo o processo, far-se-á uma referência sucinta. “A penetração das soluções salinas na rede de poros, fissuras e fraturas das rochas, a sua permanência à superfície e subsequente cristalização de sal envolve tensões que aumentam os espaços vazios conduzindo à desagregação destes materiais. Estes processos promovem a alteração das rochas, nomeadamente as de natureza calcarenítica, desenvolvendo alveolização com estruturas em favo, aspeto comum de degradação destes materiais quando expostos ao nevoeiro salino” (Simão et al., 2014).

Admita-se como exemplo, um monumento afetado por estes processos, a Fortaleza Espanhola de Bizerte, na Tunísia, no qual facilmente se pode observar os indícios de degradação avançada que apresenta resultantes da ação direta do nevoeiro salino (Simão et al., 2014).

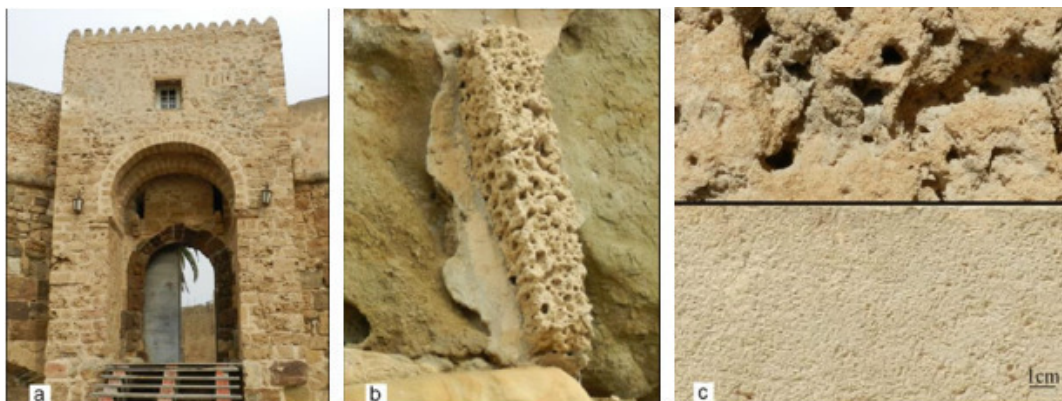


Figura 37 - a) Fachada da fortaleza espanhola de Bizerte; b) Alteração alveolar em calcarenito deteriorado; c) em cima: bloco deteriorado, em baixo: bloco com aspeto normal.

5.3.3.1 Importância do fenómeno no Arquipélago da Madeira

Devido à sua localização geográfica, a costa portuguesa (continental e insular) é afetada pelo fenómeno do “nevoeiro salino”, com intensidades que variam no espaço e no tempo. Este fenómeno pode provocar grande degradação nos materiais dos edifícios quanto maior for a sua intensidade e extensão. As zonas onde se verifica maior degradação são as zonas do litoral norte e centro, seguidas das do litoral sul e costa algarvia. Em relação aos arquipélagos regionais, a Madeira e os Açores estão também sujeitas, de forma impactante, à ação deste fenómeno. O nevoeiro salino tem na sua composição água (H_2O) e cloreto de sódio ($NaCl$), sendo este um dos sais solúveis conhecidos, que nestas circunstâncias, mais preocupação desperta (Palhais, Carreira, & Felgueiras, 2015).

Quando ocorre o processo de cristalização de sais no interior dos materiais (porosos), os cristais em crescimento, acabam por ficar confinados nos poros, levando a que exerçam pressão sobre as paredes internas, ou seja, pressão capilar. Isto origina, inevitavelmente a rotura do material.

A ocorrência da degradação associada ao $NaCl$, implica a existência combinada de água, bem como de condições suscetíveis de produzir ciclos de cristalização/dissolução. É frequente que, como resultado destas condições surjam anomalias dos mais variados tipos, como por exemplo: degradação estética, perda de material, problemas de salubridade e enfraquecimento de elementos construtivos (Palhais et al., 2015).

A resistência dos materiais ao sal, tem implícito um mecanismo de atuação que tem por base a porosidade dos materiais e consequentemente a facilidade com que absorvem ou não água.

Sendo assim, os materiais com coeficientes de absorção de água mais baixos são naturalmente aqueles que apresentam uma maior resistência ao sal. A absorção de água de um material está diretamente relacionada com a sua resistência mecânica uma vez que um coeficiente de absorção baixo, implica haver menos espaços entre as partículas garantindo dessa forma uma maior resistência (Palhais et al., 2015).

5.3.3.2 Fundamentos

O ensaio de resistência ao envelhecimento por ação de nevoeiro salino, tem como objetivo sujeitar as amostras de rocha à exposição de névoa salina, tal como aconteceria num determinado local no litoral, e desta forma, avaliar o nível de degradação ocorrido. Os provetes dos vários tipos de rocha foram submetidos a diversos ciclos de humedecimento por nevoeiro salino (solução contendo NaCl) e posterior secagem. Recorreu-se a uma câmara salina para reproduzir este tipo de ambiente e foram definidos os seguintes aspetos: número de ciclos, a duração de cada ciclo, a intensidade do nevoeiro e a temperatura de ensaio (Monteiro, 2012)(James & Pease, 2017).

Depois de submeter as amostras a todo o procedimento, foi possível, através da avaliação de indicadores como perda de massa e indícios de degradação (alveolização, erosão, alteração cromática, etc.), conferir o desgaste que este material teria, se colocado em obra. Ainda que durante este ensaio se tenha tentado simular o mais fielmente possível as condições existentes em determinado ambiente natural, é importante que se tenha em conta que se trata de um envelhecimento acelerado, existindo por isso algumas limitações, nomeadamente no que diz respeito ao tempo de permanência dos materiais dentro da câmara que não corresponde ao tempo de exposição real, ou seja, ao tempo de exposição numa situação real (Monteiro, 2012).

5.3.3.3 Metodologia

A norma a ter como referência, no que diz respeito à determinação de resistência de rochas ornamentais, face à ação do nevoeiro salino é a EN 14147 (*Natural stone test methods – Determination of resistance to ageing by salt mist*). A norma estipula a realização do ensaio em 6 provetes cúbicos com cerca de 50 mm de aresta (C. Carvalho, 2015).

O procedimento realizado constitui uma adaptação do que está descrito na norma e tem por base o seguinte:

- Colocação de provetes, numa câmara, que serão depois sujeitos a um processo de nebulização com uma solução salina composta por 1 parte de NaCl e 9 partes de água destilada. Este processo terá cerca de 4 horas de duração;
- Secagem a uma temperatura de 40 ± 5 °C durante cerca de 8 horas.

A temperatura de ensaio foi de 35 ± 5 °C. Este procedimento foi repetido 25 vezes, sendo que após cada ciclo foi feita inspeção visual dos provetes e registo fotográfico.

Na tabela seguinte apresenta-se, de forma sucinta, os tipos de rocha utilizados e a respetiva quantidade de provetes.

Tabela 7 – Tipos de rocha e número de amostras a utilizar.

	Nebulização e Secagem (25 ciclos)
Traquibasalto	2 provetes
Traquito	3 provetes
Tufo (cor de rosa)	3 provetes
Tufo Lapilli Castanho (TLC)	3 provetes
Tufo Lapilli Preto (TLP)	3 provetes
Total	14 provetes



Figura 38 - Camara salina CO.FO.ME.GRA SRL 610/400 utilizada na realização do ensaio.

5.4 Determinação da resistência mecânica

Este ensaio tem como objetivo a avaliação da resistência mecânica à compressão de pedras naturais. Os provetes a ensaiar deverão ter as superfícies retificadas e deverão ser aquecidos à temperatura de 75° C até atingirem massa constante, conforme o estipulado na norma NP EN 1926-2000 (Carmo, 2012).

Na Figura seguinte está representado um esquema dos provetes cúbicos a utilizar na realização do ensaio, bem como a exemplificação da carga aplicada na direção perpendicular aos planos de anisotropia (Carmo, 2012).

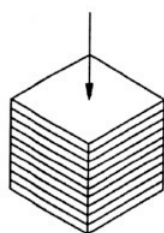


Figura 39 - Carga perpendicular aos planos de anisotropia (Carmo, 2012).

Na realização deste ensaio foram utilizadas duas prensas diferentes, uma vez que alguns tipos de rocha apresentavam uma resistência superior à capacidade máxima suportada pela prensa utilizada inicialmente que possui uma célula de carga de aproximadamente 100 kN, o que inviabilizou a realização do ensaio para algumas amostras nessa prensa. Foi então necessário a utilização de outra com capacidade superior. Isto implicou que depois fosse efetuado um tratamento de dados adicional, ou seja, enquanto que a prensa utilizada inicialmente apresentava o valor final do ensaio em MPa (tensão máxima atingida por determinada amostra), a prensa com capacidade superior apenas apresentava o resultado em kN (força máxima atingida por determinada amostra).

O ensaio de compressão foi realizado inicialmente com recurso à máquina *SHIMADZU: AG-IC 100kN*. Para os casos em que foi necessário (rochas com maior resistência) utilizou-se a máquina de ensaios *FORM+TEST PRÜFSYSTEME BETA 2-3000 D*. Os provetes foram então colocados entre os suportes e foram sujeitos à aplicação de uma força progressiva (aproximadamente 1,25 kN) até que fosse atingida a rotura.

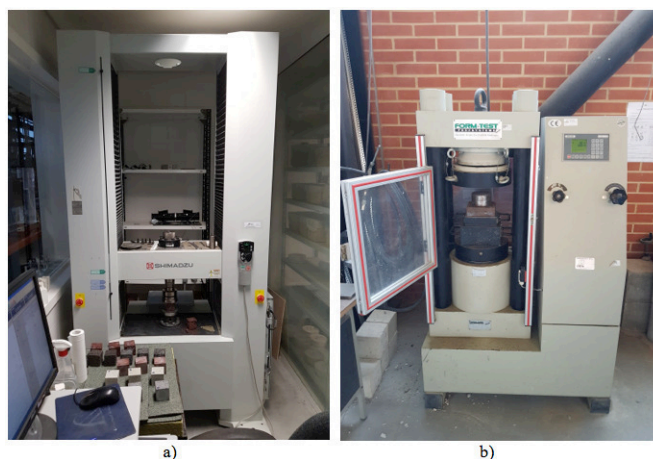


Figura 40 - a) SHIMADZU: AG-IC 100 KN; b) FORM+TEST PRÜFSYSTEME BETA 2-3000 D 3000 KN.

Na figura seguinte é possível ver um exemplo, para cada uma das máquinas utilizadas, dos provetes no momento em que está a decorrer o ensaio.

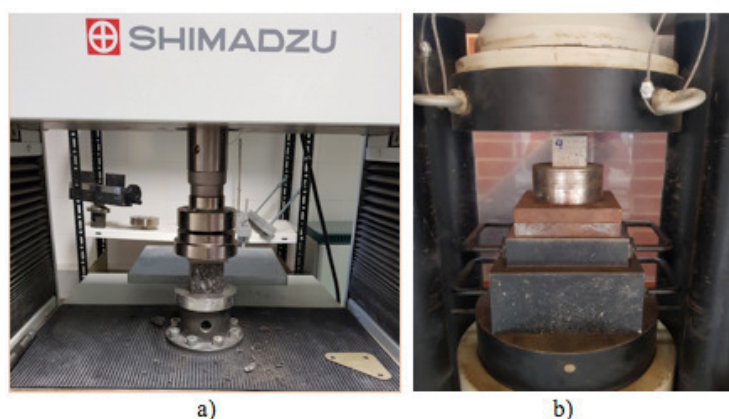


Figura 41 - a) Ensaio de resistência à compressão (SHIMADZU: AG-IC 100 KN); b) Ensaio de resistência à compressão (FORM+TEST PRÜFSYSTEME BETA 2-3000 D 3000 KN).

A equação utilizada para determinação da resistência à compressão de cada provete foi a seguinte:

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (9)$$

Sendo,

R_c – Resistência à compressão [Mpa];

F – Carga máxima na rotura [N];

A – Área [mm²].

CAPÍTULO 6

Apresentação e discussão de resultados

6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1 Método do cesto de rede metálica

A realização do procedimento laboratorial referente ao Método do cesto de rede metálica, permitiu determinar o peso das amostras nas diferentes circunstâncias (peso seco, peso saturado e peso saturado imerso). Na tabela seguinte apresentam-se os valores obtidos.

Tabela 8 - Valores resultantes do método do cesto de rede metálica.

Tipo de rocha	Nº Provete	M4 (Pesagem após secagem estufa)	M1 (Pesagem saturado)	M2-M3 (Pesagem saturado imerso)
Traquito	4	288,20	298,80	169,90
	5	283,47	295,10	168,10
	6	288,48	299,80	171,20
Traquibasalto	4	330,36	335,30	207,40
	5	325,30	330,90	204,10
Tufo (Cor de rosa)	4	260,30	284,20	160,90
	5	260,84	286,80	162,00
	6	256,86	283,00	159,10
TLC	4	195,12	226,10	100,50
	5	206,01	235,40	111,00
	6	203,68	232,60	107,20
	13	203,60	230,90	105,50
	14	194,96	223,10	100,80
TLP	4	192,29	222,50	100,60
	5	191,54	224,00	97,70

	6	191,83	222,10	100,20
	13	189,32	219,40	99,00
	14	191,63	222,60	98,10

No cálculo dos diversos parâmetros, indicados abaixo, foram tidos em conta os seguintes dados: massa em gramas; $T_w = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\rho_w = 0,9986\text{ Mg/m}^3$. Uma vez que os provetes utilizados neste procedimento já tinham sido utilizados no ensaio de Pundit, achou-se por bem introduzir dois novos provetes (nº 13 e nº 14) que não tinham passado por esse processo. A necessidade surgiu quando, depois de aplicada a massa de contacto nas faces dos provetes, se especulou até que ponto poderia esse material poder impermeabilizar as faces da amostra comprometendo assim os resultados obtidos (IPQ, 2004).

6.2 Massa volúmica

Tabela 9 - Cálculo da massa volúmica.

Tipo de rocha	Nº Provede	ρ_{rd} - Massa Volúmica provetes secos em estufa (Mg/m ³)	Média
Traquito	4	2,24	2,24
	5	2,24	
	6	2,25	
Traquibasalto	4	2,59	2,58
	5	2,57	
Tufo (Cor de rosa)	4	2,11	2,09
	5	2,09	
	6	2,08	
TLC	4	1,56	1,61

	5	1,66	
	6	1,63	
	13	1,63	
	14	1,60	
TLP	4	1,58	1,56
	5	1,52	
	6	1,58	
	13	1,57	
	14	1,54	

6.3 Absorção de água

Tabela 10 - Cálculo dos valores percentuais de absorção de água.

Tipo de rocha	Nº Provete	WA24 - Absorção de água (%)	Média
Traquito	4	3,7	3,9
	5	4,1	
	6	3,9	
Traquibasalto	4	1,5	1,6
	5	1,7	
Tufo (Cor de rosa)	4	9,2	9,8
	5	10,0	
	6	10,2	
TLC	4	15,9	14,4

	5	14,3	
	6	14,2	
	13	13,4	
	14	14,4	
TLP	4	15,7	16,1
	5	16,9	
	6	15,8	
	13	15,9	
	14	16,2	

6.4 Porosidade aberta

Tabela 11 - Cálculo da porosidade.

Tipo de rocha	Nº Provete	Porosidade Aberta	Média
Traquito	4	8,22	8,73
	5	9,16	
	6	8,80	
Traquibasalto	4	3,86	4,14
	5	4,42	
Tufo (Cor de rosa)	4	19,38	20,43
	5	20,80	
	6	21,10	
TLC	4	24,67	23,23

	5	23,63	
	6	23,06	
	13	21,77	
	14	23,01	
TLP	4	24,78	25,03
	5	25,70	
	6	24,83	
	13	24,98	
	14	24,88	

6.5 Densidade aparente

Tabela 12 - Cálculo da densidade.

Tipo de rocha	Nº Provete	Densidade aparente (g/cm ³)	Média
Traquito	4	2,2263	2,22
	5	2,1892	
	6	2,2413	
Traquibasalto	4	2,5694	2,55
	5	2,5321	
Tufo (Cor de rosa)	4	2,1002	2,08
	5	2,0865	
	6	2,0625	
TLC	4	1,4955	1,54

	5	1,5931	
	6	1,5760	
	13	1,5506	
	14	1,5045	
TLP	4	1,5246	1,50
	5	1,4612	
	6	1,5190	
	13	1,4934	
	14	1,4872	

Em seguida apresenta-se uma tabela resumo com os parâmetros determinados anteriormente.

Tabela 13 - Tabela resumo dos parâmetros calculados anteriormente.

	Densidade Aparente (ρ - g/cm³)	Massa Volúmica (ρ_{rd} - Mg/m³)	Porosidade Aberta (PA - %)	Absorção de água (WA₂₄ - %)
Traquibasalto	2,55	2,58	4,14	1,6
Traquito	2,22	2,24	8,73	3,9
Tufo (Cor de rosa)	2,08	2,09	20,43	9,8
TLC	1,54	1,61	23,23	14,4
TLP	1,50	1,56	25,03	16,1

Como se pode verificar ao analisar a tabela as rochas que apresentaram maior valor de densidade e massa volúmica têm uma percentagem menor de porosidade e absorção de água. Por outro lado, as rochas para as quais se obteve um valor de densidade e massa volúmica

mais baixa acabaram por ter uma maior percentagem de porosidade e mais facilidade de absorção de água, apresentando assim um valor maior para este parâmetro.

A introdução dos provetes nº 13 e nº 14, para verificação da eventual impermeabilização das rochas, resultante da aplicação de massa de contacto nas faces dos provetes, demonstrou não haver alteração digna de registo.

6.6 Absorção de água por capilaridade

Para determinação da absorção de água por capilaridade nos provetes, foi realizado o respetivo ensaio e apresenta-se, em seguida, os resultados obtidos.

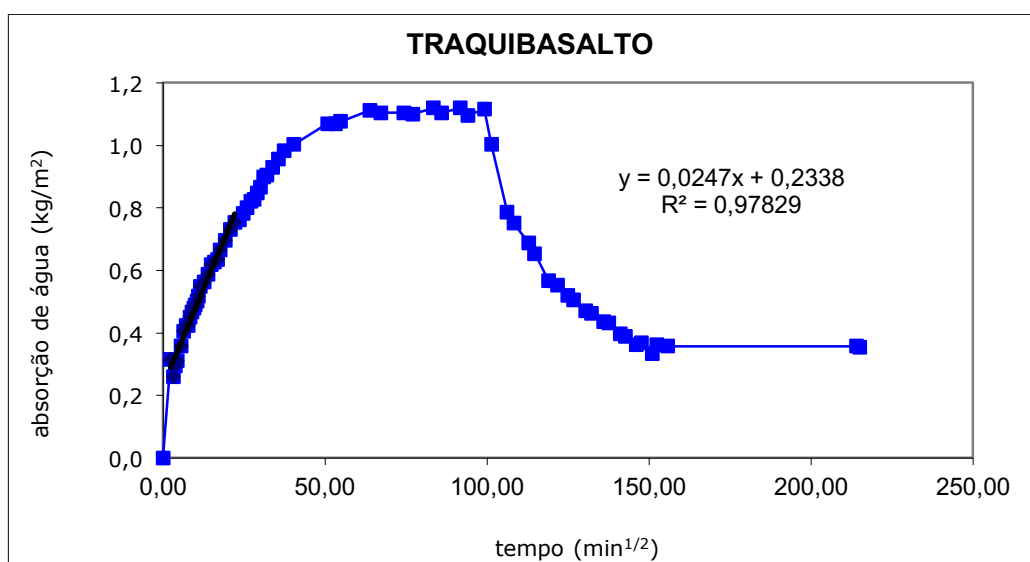


Figura 42 - Curva de capilaridade do provete TQ4.

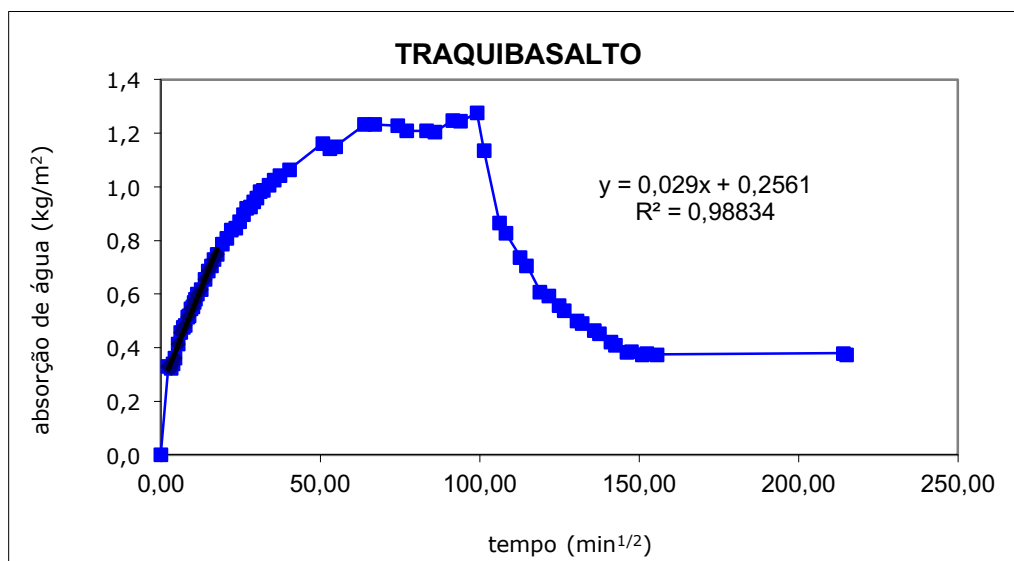


Figura 43 - Curva de capilaridade do provete TQ5

Tabela 14 - Coeficiente de capilaridade do Traquibasilto

TRAQUIBASALTO		
Nº Provete	CC (Coeficiente de capilaridade – Kg/m²*min¹/²)	CC (Médio)
4	0,025	0,027
5	0,029	

Ao realizar o ensaio para este tipo de rocha, verificou-se que os seus provetes tinham uma absorção de água lenta em comparação com as restantes rochas. Ao observar os gráficos obtidos podemos ver que têm um comportamento muito semelhante entre si, à imagem do que acontece com todos os provetes que sejam do mesmo tipo de rocha.

A curva de capilaridade dos provetes de Traquibasilto indicam que houve uma fase de saturação mais ou menos uniforme em que há uma absorção contínua de água até à marca aproximada de 60 min¹/². Após essa marca começa a haver uma diminuição gradual da absorção de água até a linha do gráfico atingir um patamar que se mantém até cerca de 100 min¹/², iniciando depois a fase de secagem em que há uma perda gradual e contínua de água

até os provetes atingirem uma massa constante que será aproximadamente igual á inicial. Para o traquibasilto, o ensaio deu-se por concluído sensivelmente aos 215,08 min^{1/2}.

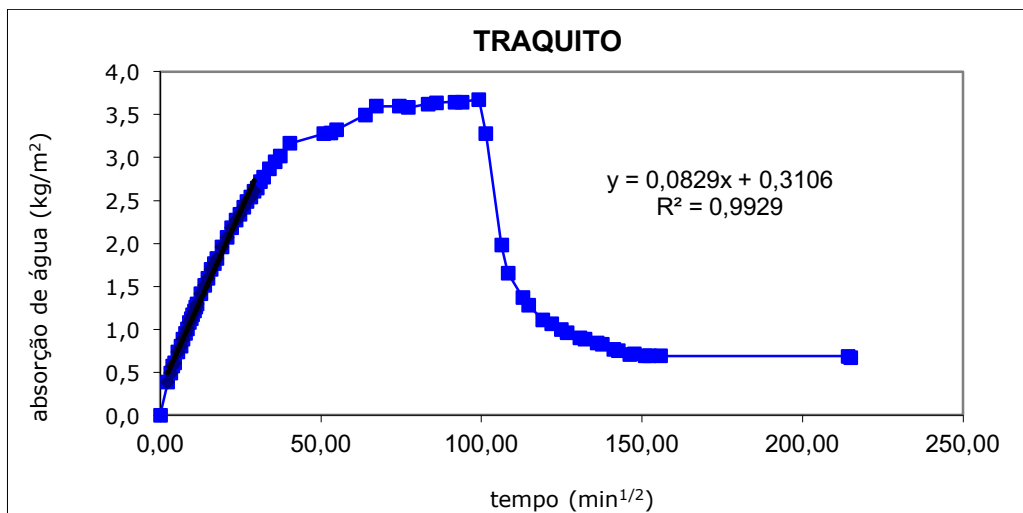


Figura 44 - Curva de capilaridade do provete T4.

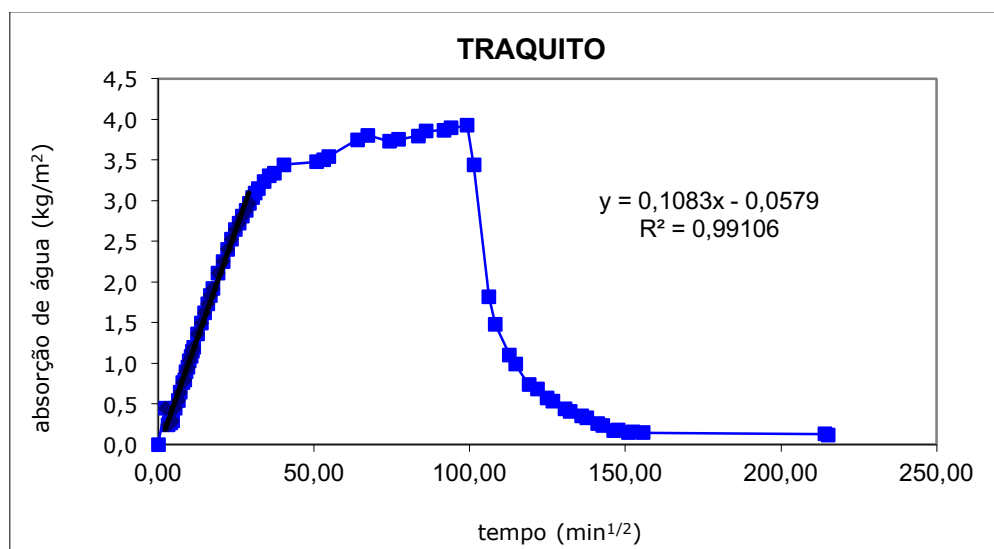


Figura 45 - Curva de capilaridade do provete T5

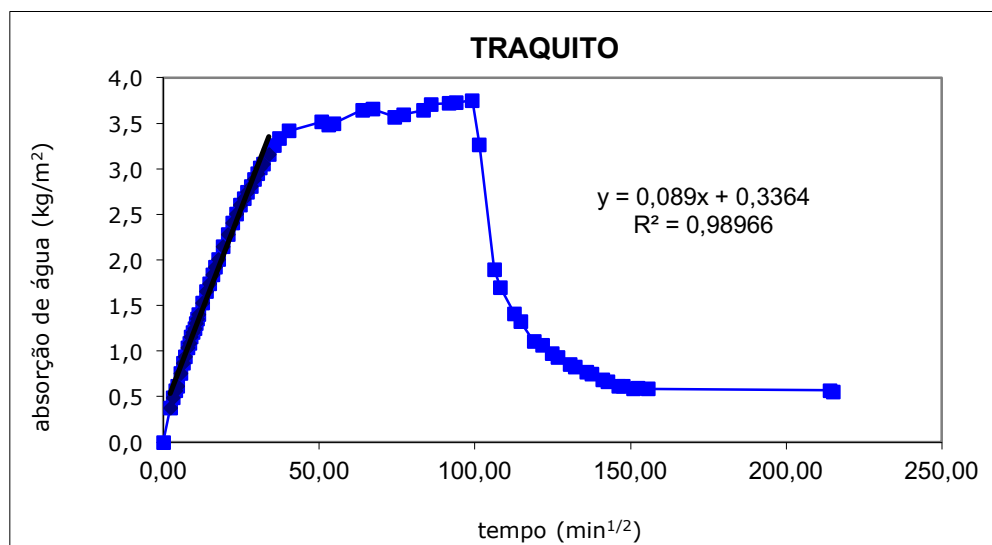


Figura 46 - Curva de capilaridade do provete T6

Tabela 15 - Coeficiente de capilaridade do Traquito

TRAQUITO		
Nº Provete	CC (Coeficiente de capilaridade - Kg/m²*min¹/²)	CC (Médio)
4	0,083	0,093
5	0,108	
6	0,089	

No que diz respeito ao Traquito, os seus provetes apresentam uma curva de capilaridade uniformemente crescente desde o início do ensaio até um intervalo entre os 50 min¹/² e os 100 min¹/² onde verifica uma diminuição e posteriormente estabilização da absorção de água, iniciando depois a fase de secagem que se iniciou então aos 100 min¹/² e continuou até ao final do ensaio que ocorreu aos 215,08 min¹/².

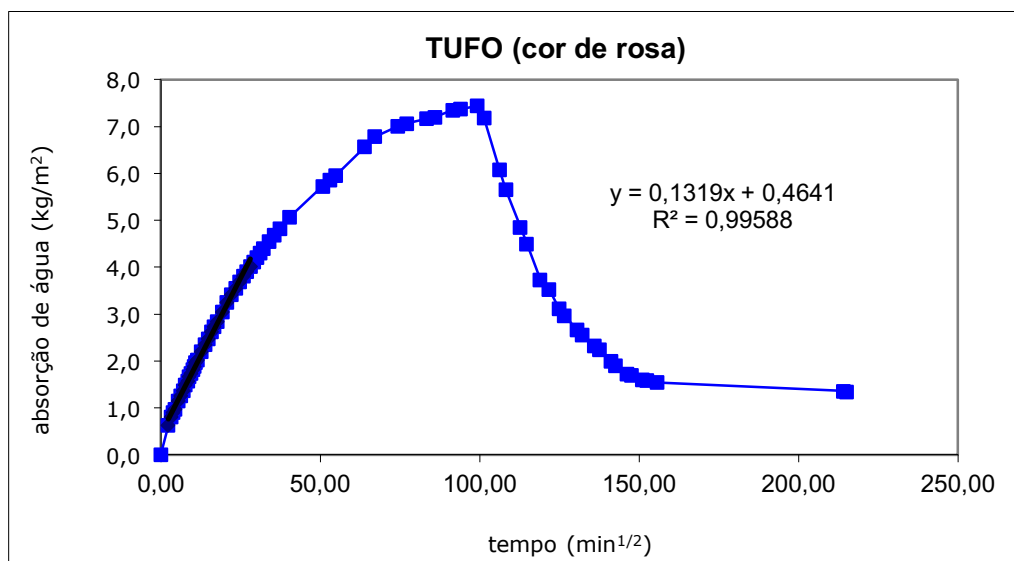


Figura 47 - Curva de capilaridade do provete Tf4

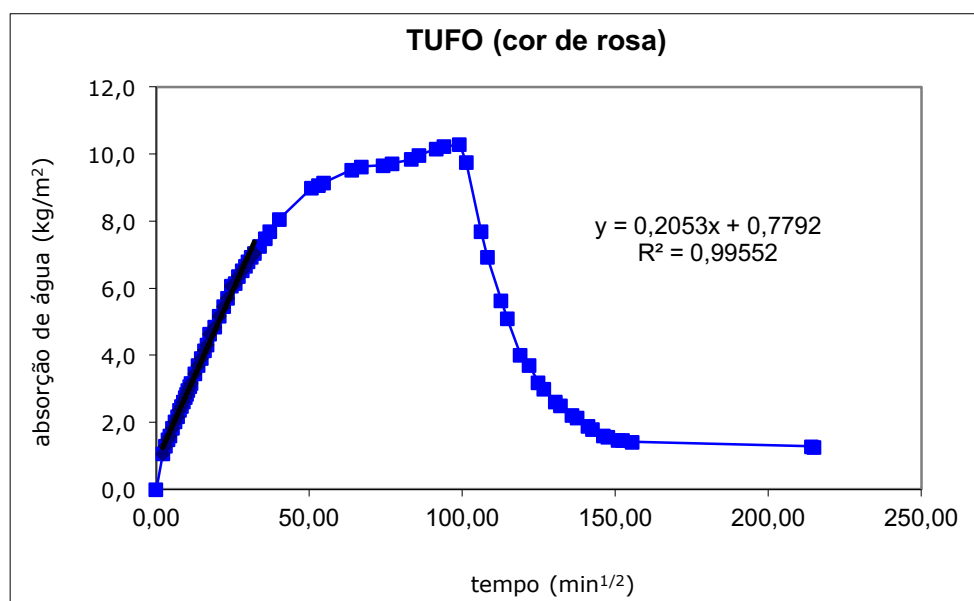


Figura 48 - Curva de capilaridade do provete Tf5

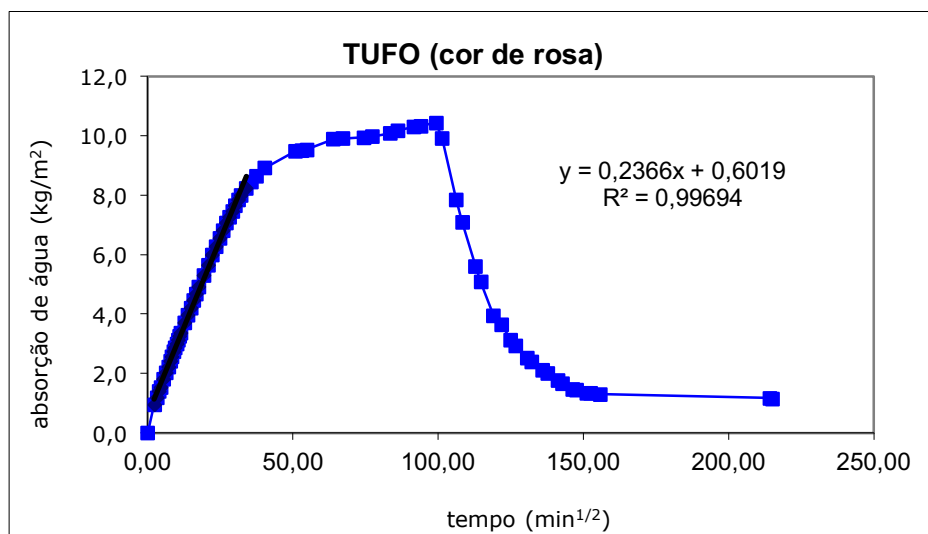


Figura 49 - Curva de capilaridade do provete Tf6

Tabela 16 - Coeficiente de capilaridade do Tufo (cor de rosa)

TUFO (Cor de rosa)		
Nº Provete	CC (Coeficiente de capilaridade - Kg/m²*min^{1/2})	CC (Médio)
4	0,132	0,191
5	0,205	
6	0,237	

Em relação ao Tufo (Cor de rosa) a sequência foi a seguinte: desde início do ensaio até cerca dos 70 min^{1/2} há um crescimento contínuo e uniforme da quantidade de água absorvida. No intervalo de valores compreendido entre 70 min^{1/2} e 100 min^{1/2} verifica-se a existência de estabilização da absorção de água, havendo assim na linha do gráfico um patamar que indica isso mesmo. A partir dos 100 min^{1/2} e até final do ensaio deu-se a fase de secagem que se deu por finalizada aos 215,08 min^{1/2}.

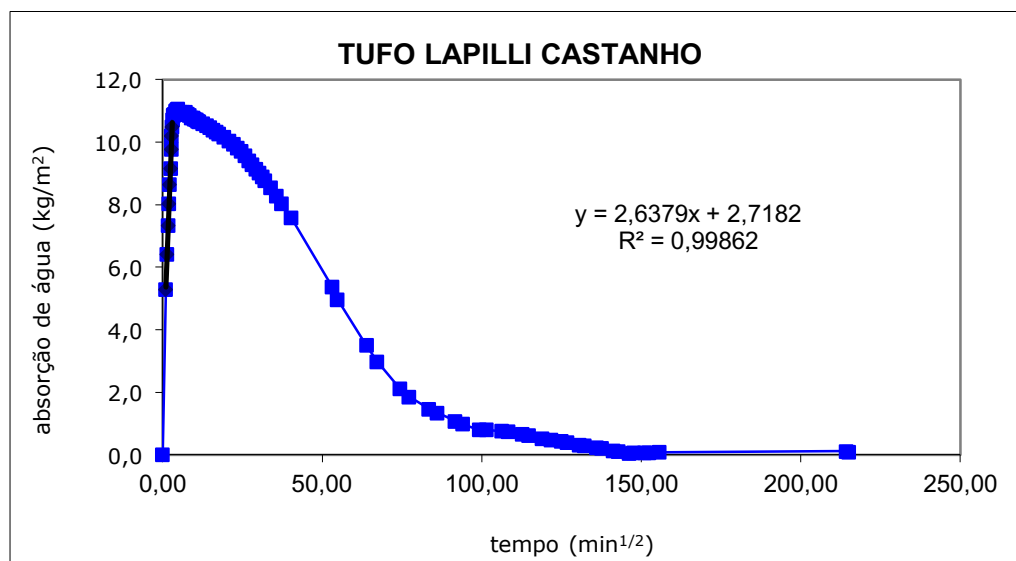


Figura 50 - Curva de capilaridade do provete TLC4

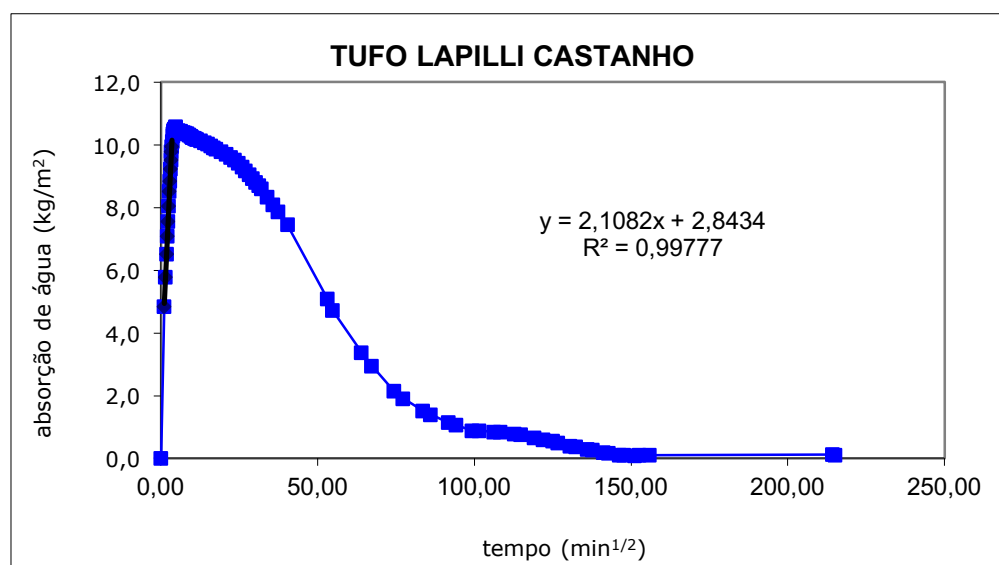


Figura 51 - Curva de capilaridade do provete TLC5

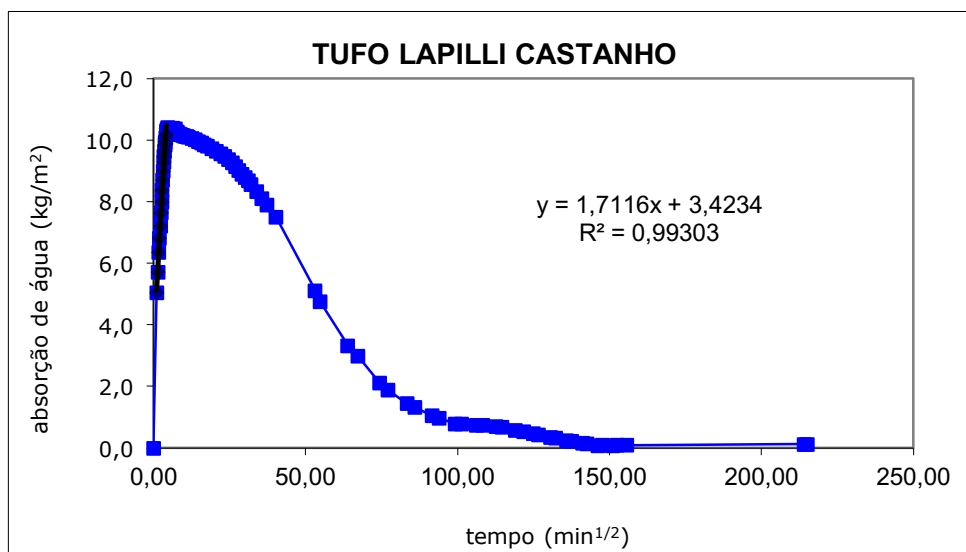


Figura 52 - Curva de capilaridade do provete TLC6

Tabela 17 - Coeficiente de capilaridade do TLC

TUFO LAPILLI CASTANHO		
Nº Provete	CC (Coeficiente de capilaridade - Kg/m ² *min ^{1/2})	CC (Médio)
4	2,638	2,153
5	2,108	
6	1,712	

Nos provetes do Tufo Lapilli Castanho verificou-se uma absorção de água extremamente rápida em comparação com os casos anteriores. A fase de saturação é predominante desde o início do ensaio e até cerca dos 4,69 min^{1/2}. A partir dessa marca iniciou-se a fase de secagem que continuou até final do ensaio que ocorre por volta dos 215,08 min^{1/2}.

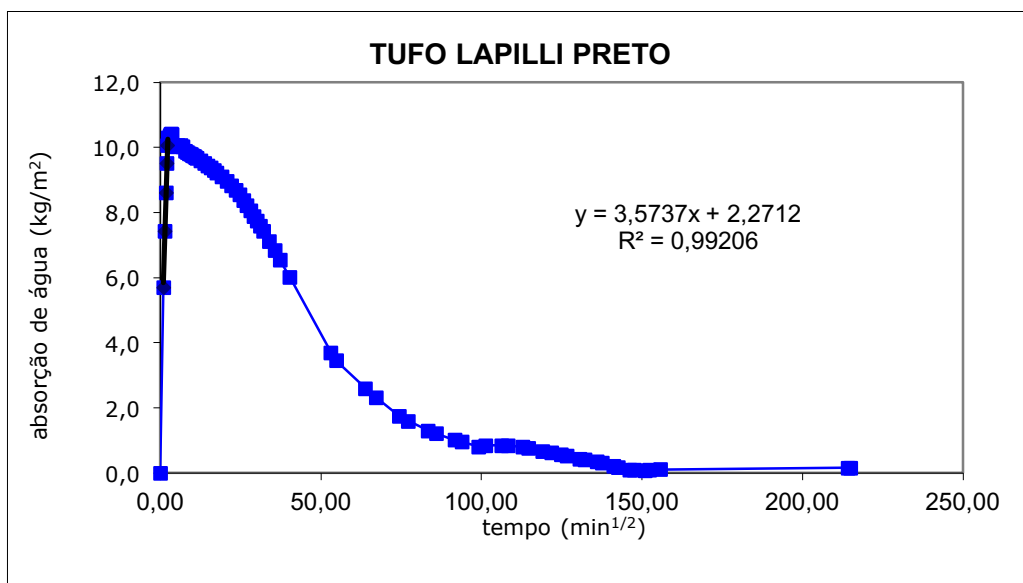


Figura 53 - Curva de capilaridade do TLP4

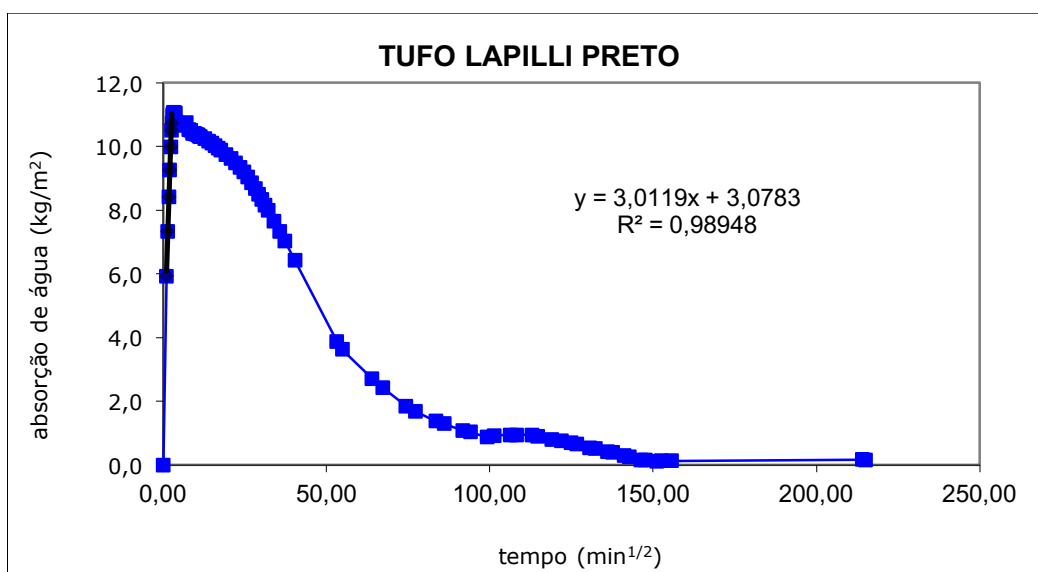


Figura 54 - Curva de capilaridade do TLP5

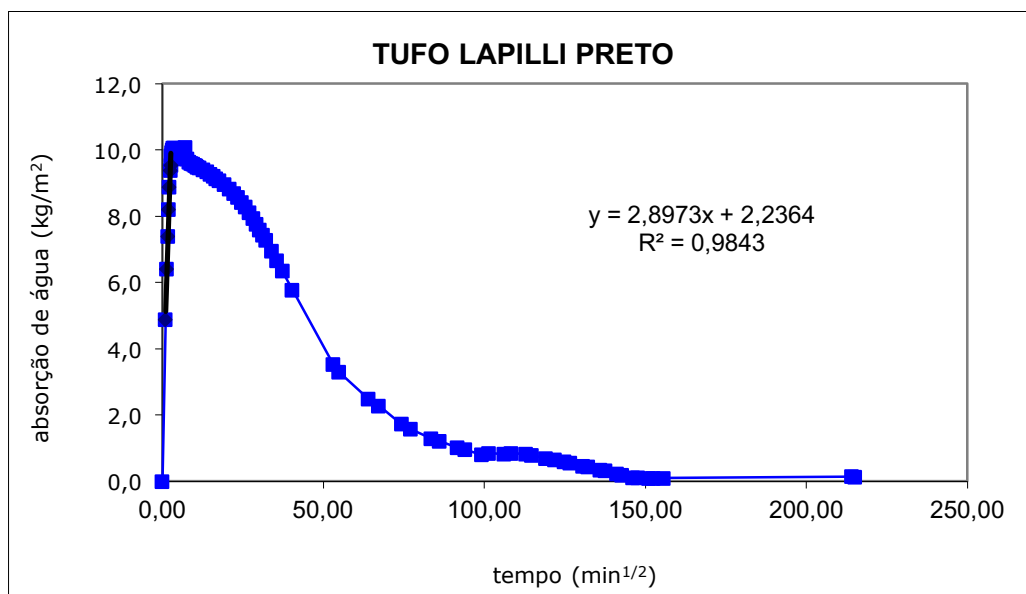


Figura 55 - curva de capilaridade do TLP6

Tabela 18 - Coeficiente de capilaridade do TLP

TUFO LAPILLI PRETO		
Nº Provete	CC (Coeficiente de capilaridade - Kg/m²*min^{1/2})	CC (Médio)
4	3,574	3,161
5	3,012	
6	2,897	

Nos provetes de Tufo Lapilli Preto o que se verificou, á parte de pequenas diferenças, foi um comportamento muito semelhante ao caso analisado anteriormente (Tufo Lapilli Castanho), ou seja, a fase de saturação ocorre desde o início do ensaio e até aos 3,46 min^{1/2} onde ocorreu também uma absorção de água muito rápida. A partir desse momento iniciou-se a fase de secagem que acaba no final do ensaio aos 215,08 min^{1/2} aproximadamente.

No gráfico seguinte está apresentado um resumo, em função do coeficiente de capilaridade de cada tipo de rocha, que sintetiza a informação a reter deste ensaio.

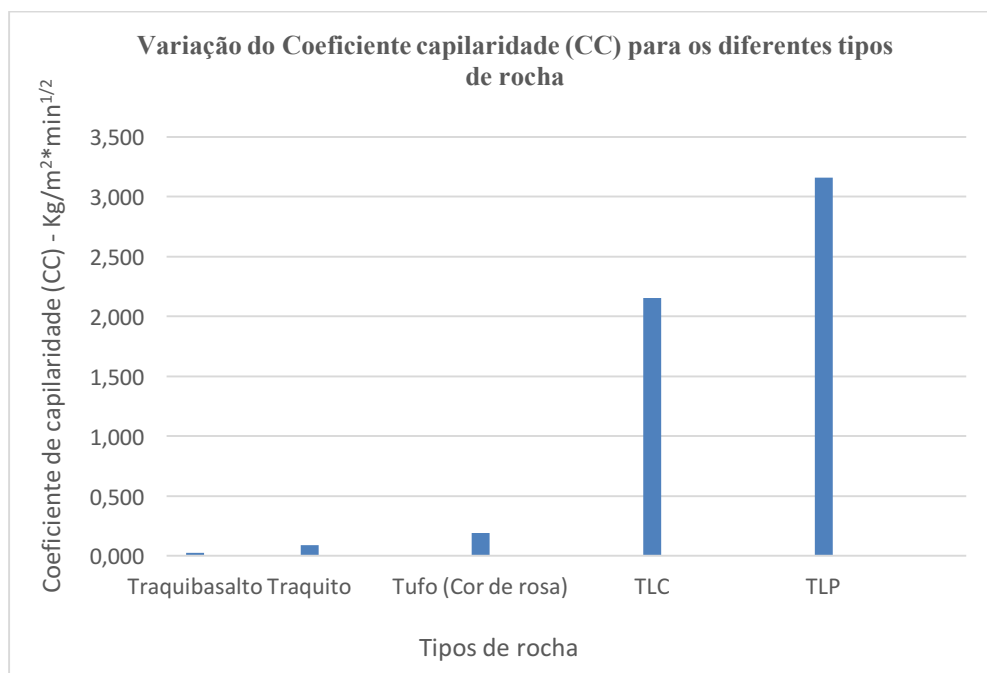


Figura 56 - Variação do coeficiente de capilaridade para os vários tipos de rocha.

Ao analisar o gráfico verificamos que o Traquibasalto (rocha que possui menor porosidade) tem o coeficiente de capilaridade mais baixo dos vários tipos de rocha testados. Por outro lado, a rocha que possui uma maior porosidade possui o maior valor do coeficiente de capilaridade. Existe, portanto, neste caso, uma relação diretamente proporcional entre a porosidade e o coeficiente de capilaridade, rochas com maior porosidade têm também maior valor de CC, conforme esperado.

6.7 Ensaio de Pundit

Tabela 19 - Valores obtidos através do Ensaio de Pundit.

Tipo de Rocha	Nº Amostra	Medição Pundit (µs - microsegundo)			Média
		X	Y	Z	
Traquibasalto	4	11,3	11,0	11,2	11,4
	5	11,2	12,3	11,3	
Traquito	4	15,7	18,0	16,8	17,7

	5	18,5	18,1	17,5	
	6	17,1	19,5	18,7	
Tufo (Cor de rosa)	4	16,5	17,3	16,8	17,8
	5	17,5	17,8	18,9	
	6	18,1	17,1	20,2	
Tufo Lapilli Castanho (TLC)	4	19,4	21,5	21,7	18,2
	5	16,6	19,6	15,4	
	6	13,8	16,1	19,8	
Tufo Lapilli Preto (TLP)	4	26,6	24,2	27,3	25,4
	5	22,8	27,3	24,6	
	6	22,3	26,8	27,1	

Após a realização do ensaio de Pundit (*Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester*) e analisando os valores obtidos é possível perceber que há nestes valores também uma relação que se pode estabelecer com a porosidade do material. As rochas com menor porosidade obtiveram valores do Pundit mais baixos e vice-versa. Isto pode ser explicado pelo facto de que em rochas mais compactas/densas onde existe um menor número de vazios a onda demora menos tempo a atravessar o material. Naquelas que apresentem maior porosidade e por isso também uma estrutura interna mais complexa, a onda demora mais tempo a atravessar.

6.8 Determinação do Módulo de Elasticidade

Tabela 20 - Valores do Módulo de Elasticidade para cada tipo de rocha.

Tipo de rocha	T (μ s)	Ed (MPa)	Ed (GPa)
Traquibasalto	11,40	49977,16	49,98
Traquito	17,70	17785,49	17,79
Tufo (Cor de rosa)	17,80	16727,25	16,73
T.L.C	18,20	11738,22	11,74
T.L.P	25,40	6062,34	6,06

No gráfico seguinte apresentam-se os valores médios para cada tipo de rocha.



Figura 57 - Valores médios do módulo de elasticidade.

Ao analisar o gráfico anterior percebemos que o Traquibasalto apresenta um valor, do Módulo de elasticidade, muito superior aos restantes tipos de rocha. O que acaba por ir de encontro aos parâmetros determinados e apresentados anteriormente (massa volúmica,

absorção de água e densidade) em que se verifica que o Traquibasalto é a rocha com maior densidade, menor porosidade e que apresentou maior resistência ao ensaio de compressão.

6.9 Ensaios de envelhecimento acelerado

6.9.1 Ensaio de resistência à cristalização de sais

Em seguida são apresentados gráficos que mostram como variou, ao longo do tempo, a massa das amostras, dos diferentes tipos de rocha e fotos ilustrativas da degradação ocorrida ao longo dos ciclos de envelhecimento realizados.

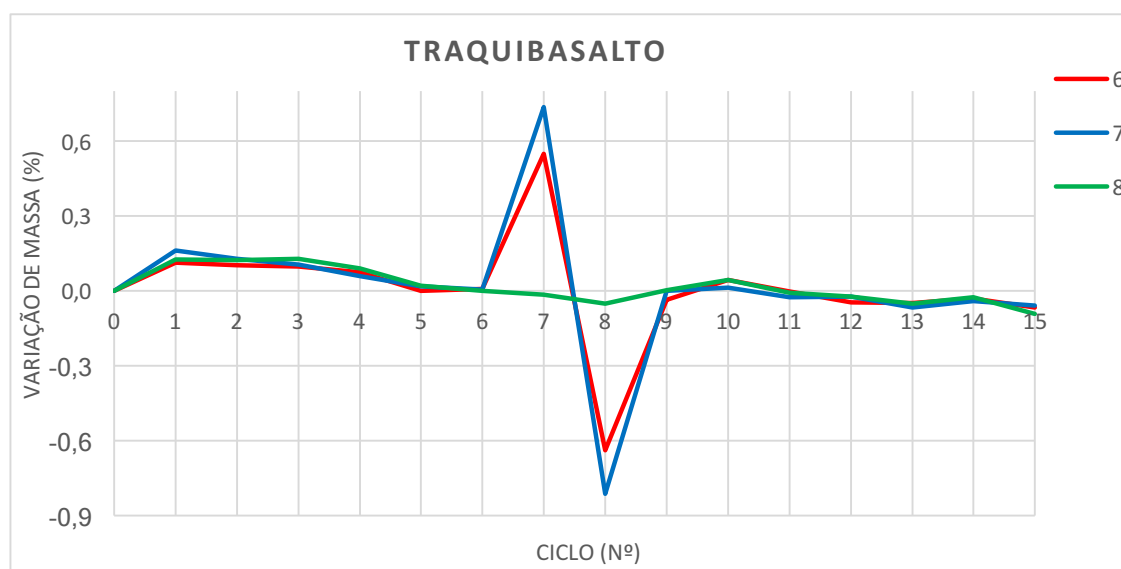


Figura 58 - Variação de massa do Traquibasalto.

Ao observar o gráfico, referente à alteração de massa registrada para o Traquibasalto, aquilo que verificamos é que para o provete nº 8 ocorreu uma pequena variação de massa ao longo dos 15 ciclos realizados. Em relação aos provetes nº 6 e nº 7 tiveram um comportamento muito semelhante face ao ensaio, em que se verificou também uma pequena variação de massa ao longo de quase todo o ensaio à exceção do intervalo entre 6º e 9º ciclo em que verifica primeiro um ganho brusco e depois uma perda brusca de massa.

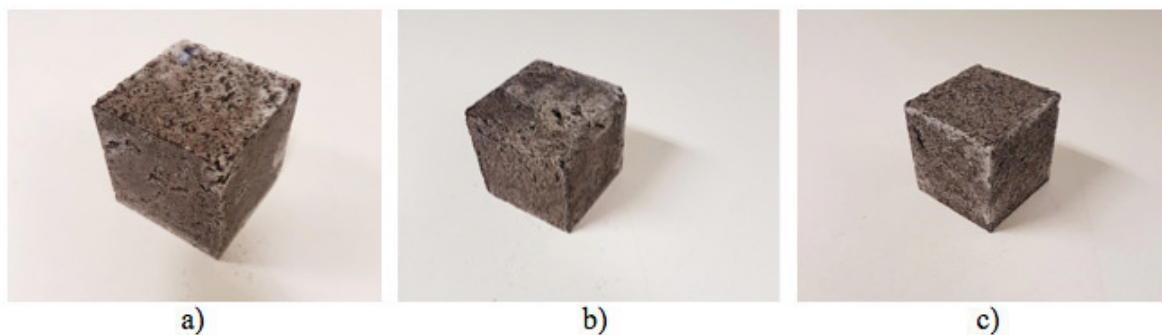


Figura 59 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 7º ciclo; c) Provete após o 15º ciclo.

Os provetes deste tipo de rocha foram os únicos a completar os 15 ciclos recomendados pela norma. Os restantes provetes resistiram a 14 ou menos ciclos. Sempre que um provete deixava de apresentar uma secção minimamente definida, com um nível de degradação avançado e perda de coesão do material, optou-se por interromper o envelhecimento para esse provete ou para esse tipo de rocha, uma vez que os provetes do mesmo tipo de rocha apresentavam comportamentos idênticos perante o envelhecimento.

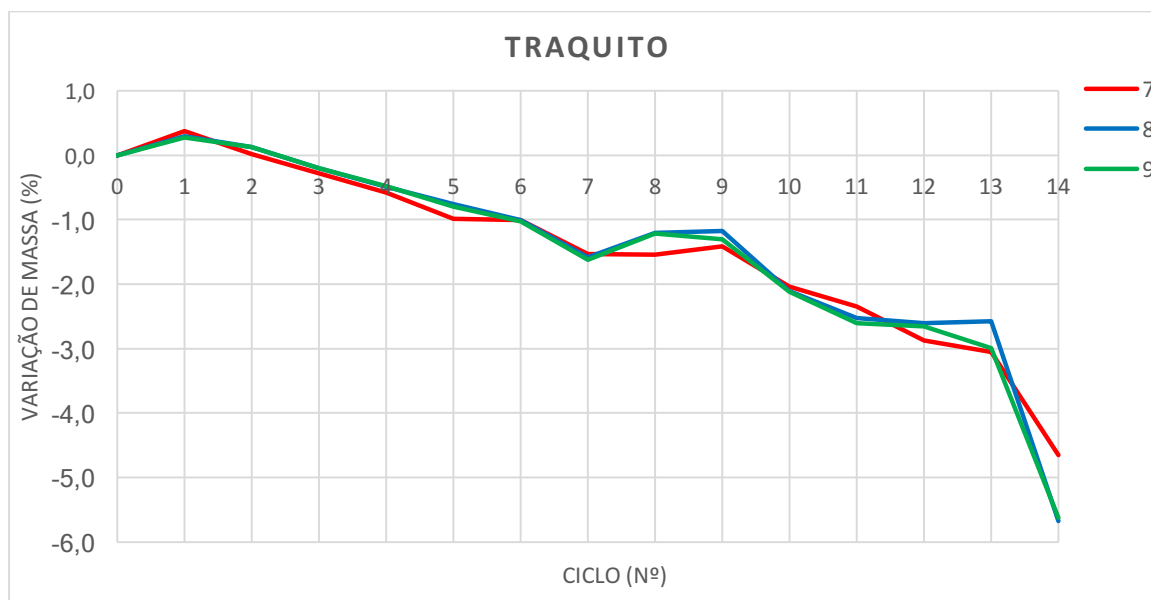


Figura 60 - Variação de massa do Traquito

No caso do Traquito o comportamento dos provetes deste tipo de rocha foi aproximadamente igual ao longo dos 14 ciclos a que foi submetida. No final do ensaio os provetes apresentaram uma perda de sensivelmente 5% da sua massa inicial.

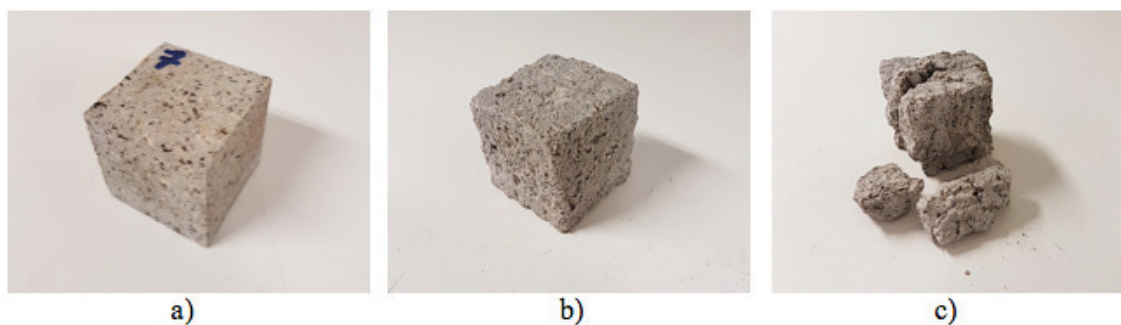


Figura 61 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 7º ciclo; c) Provete após o 14º ciclo.

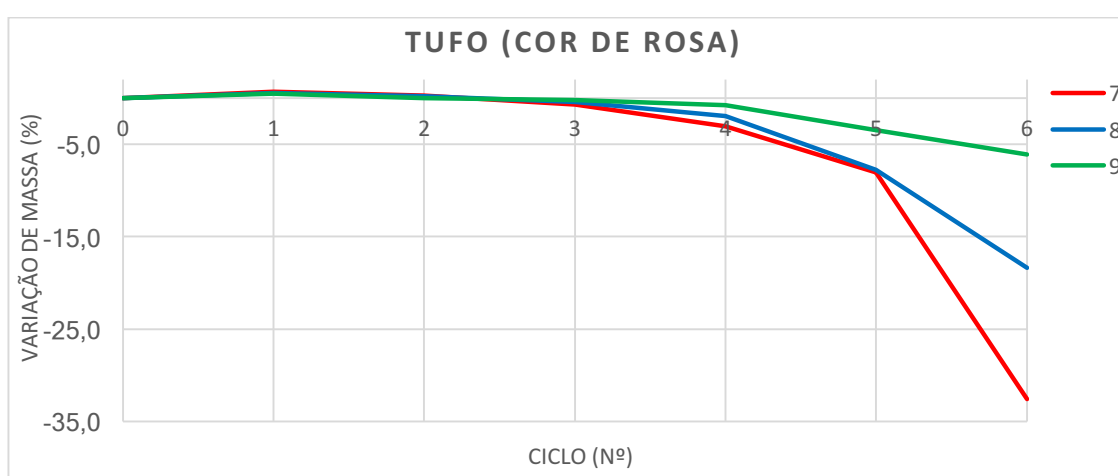


Figura 62 - Variação de massa do Tufo (Cor de rosa).

Neste tipo de rocha começou já a se verificar uma perda relativamente acentuada de massa. O tufo (cor de rosa) foi submetido a cerca de 6 ciclos. Inicialmente e até cerca do 4º ciclo, a massa permaneceu praticamente inalterada, a partir deste ciclo começou-se a verificar uma perda de massa dos provetes cada vez mais acentuada chegando mesmo a atingir a ordem dos 30% aproximadamente.

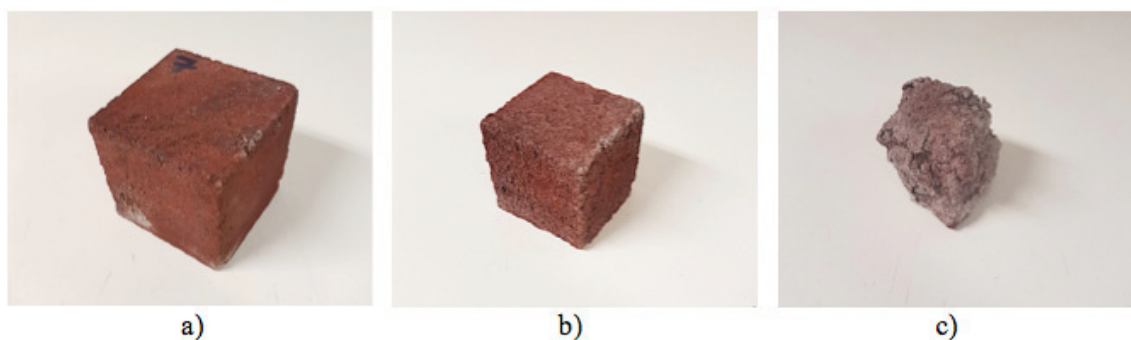


Figura 63 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 3º ciclo; c) Provete após o 6º ciclo.

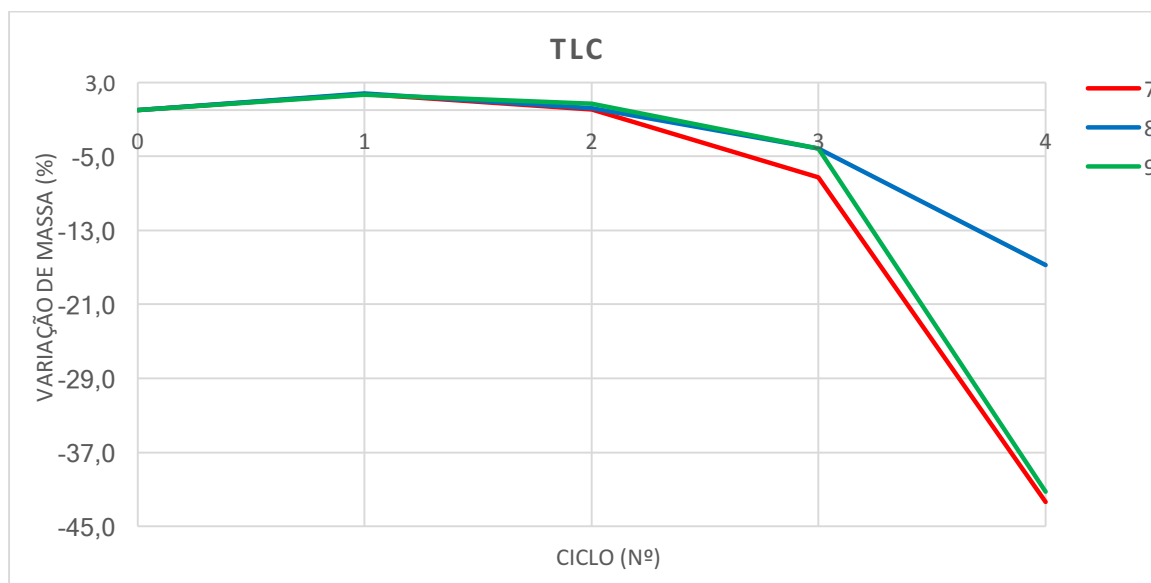


Figura 64 - Variação de massa do Tufo Lapilli Castanho

O Tufo de Lapilli Castanho (TLC) foi o tipo de rocha que perdeu maior percentagem da sua massa. O TLC foi submetido a 4 ciclos do ensaio. Olhando para o gráfico e analisando o comportamento dos seus provetes é possível ver que desde o início do ensaio e até ao 3º ciclo é praticamente idêntico. A partir do 3º ciclo em qualquer dos 3 provetes se verifica uma perda bastante acentuada da sua massa, onde 2 provetes chegaram a perder quase metade da sua massa inicial.

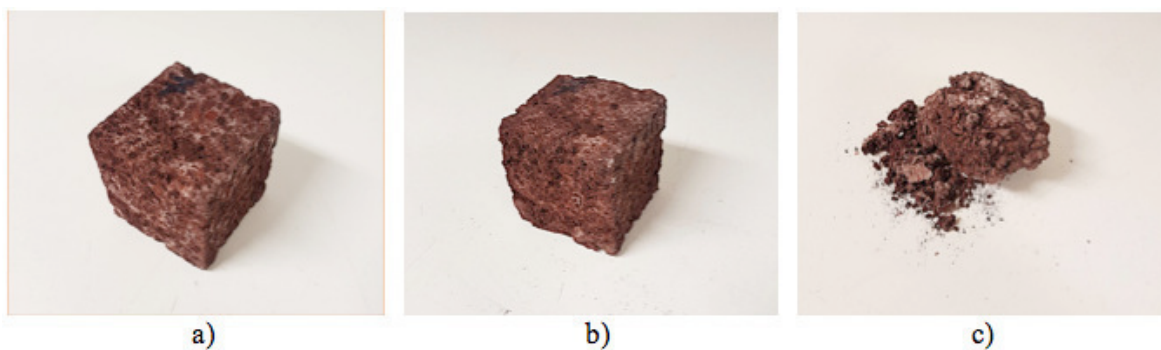


Figura 65 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 2º ciclo; c) Provete após o 4º ciclo.

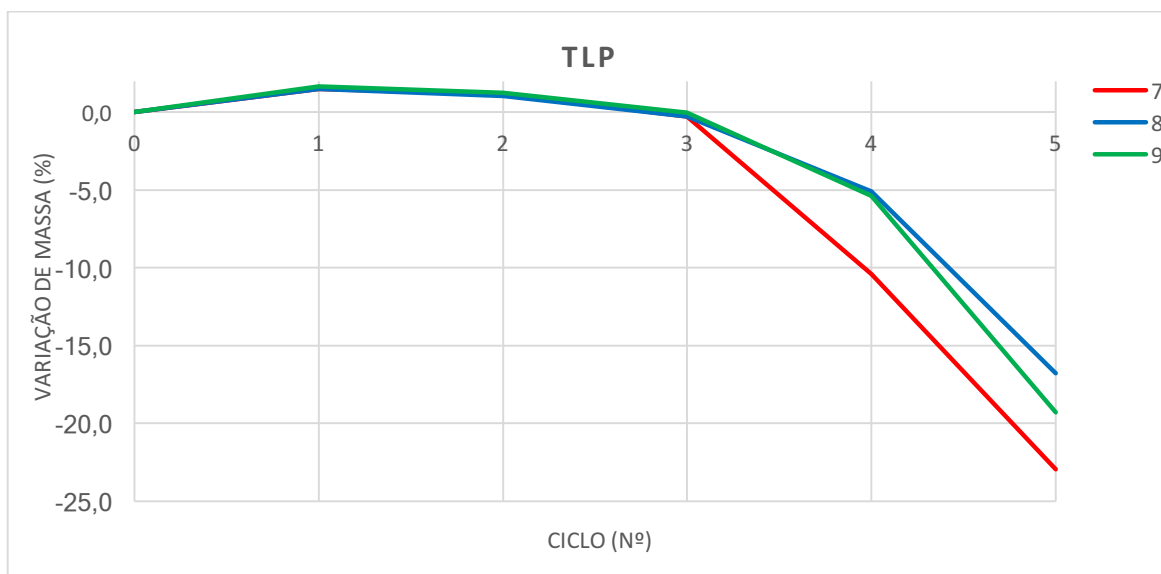


Figura 66 - Variação de massa do Tufo Lapilli Preto

Para os provetes do Tufo Lapilli Preto (TLP) obteve-se um comportamento semelhante aos do Tufo Lapilli Castanho (TLC). Aqui verificou-se também desde o início do ensaio e até ao 3º ciclo uma variação mais ou menos uniforme nos 3 provetes. A partir dessa marca registou-se uma perda significativa na sua massa. O provete nº 7 foi o que perdeu maior quantidade de massa, chegando essa perda a atingir cerca de 22%.

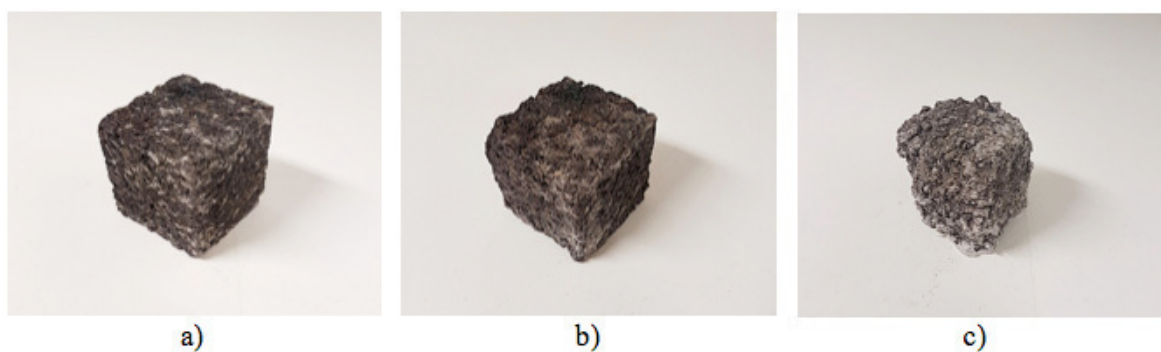


Figura 67 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 3º ciclo; c) Provete após o 5º ciclo.

A título de comparação apresentam-se fotos em que se pode verificar as alterações ocorridas no conjunto de todos os provetes submetidos a envelhecimento. Nas fotos é possível ver o estado dos provetes no início e no final do ensaio. Para a maioria dos tipos de rocha o ensaio foi extremamente agressivo fazendo que no final os provetes apresentassem um nível de degradação bastante avançado e uma perda considerável da sua secção inicial.

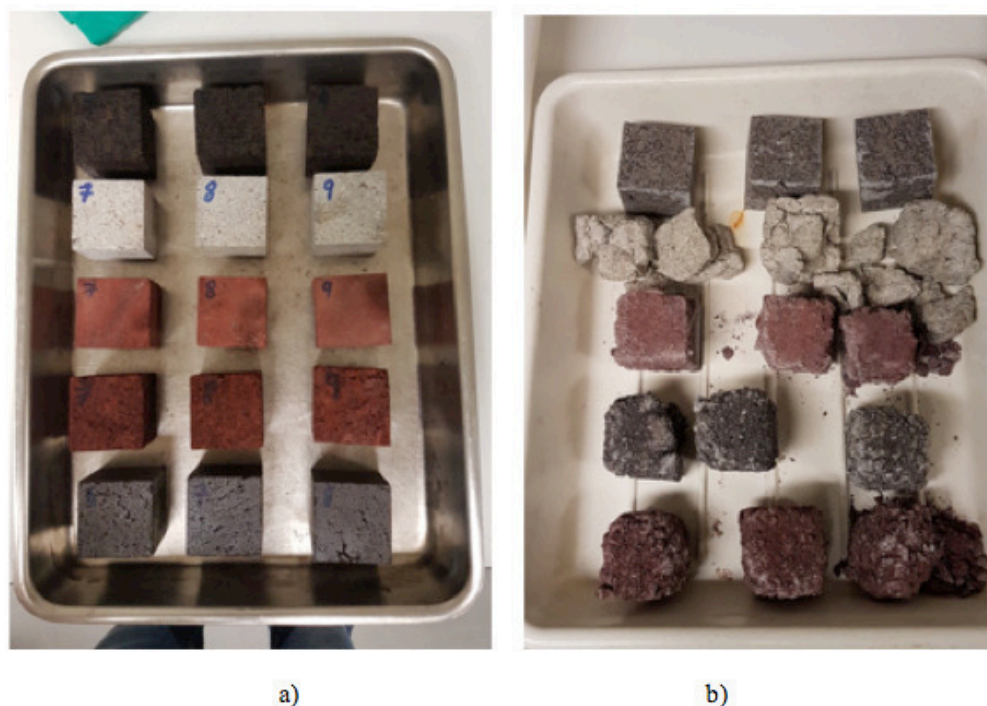


Figura 68 - a) Estado inicial dos provetes; b) Estado dos provetes concluído o ensaio.

Na tabela resumo apresentada em seguida é indicado o número de ciclos do ensaio que cada tipo de rocha resistiu até os seus provetes entrarem numa fase de degradação tão avançada que, na maioria dos casos, deixaram de possuir uma secção minimamente definida. A perda de material foi evidente e muito significativa, conforme se pode verificar nas fotos apresentadas anteriormente.

Tabela 21 - Número de ciclos que cada tipo de rocha resistiu.

Tipo de rocha	Nº ciclos realizados
Traquibasilto	15
Traquito	14
Tufo (Cor de rosa)	6
TLC	4
TLP	5

Finalizado o ensaio, aquilo que se observou, de forma geral, em todas as rochas á exceção do Traquibasilto (rocha em que se obteve um comportamento melhor face ao

envelhecimento), foram os efeitos devastadores que este sal provoca no material, tais como: desfalecimento da sua cor natural; perda de coesão, levando a uma grande diminuição da sua secção, bem como perda de arestas definidas, ocorrendo o arredondamento das mesmas e ainda aparecimento de fissuras.

A desagregação de material observada nas amostras pode ser explicada, pelo facto de eventualmente ter ocorrido dissolução de uma das fases estáveis do sulfato sódio, a ternadite, originando assim uma solução sobressaturada de mirabilite. Ora a cristalização da mirabilite neste contexto implica um aumento de volume brusco que leva à ocorrência de tensões nos poros e inevitavelmente à desagregação da rocha.

6.9.2 Ensaio de resistência ao envelhecimento por variação de temperatura e humidade relativa

Em seguida serão apresentados gráficos que mostram como variou, ao longo do tempo, a massa das amostras, dos diferentes tipos de rocha e fotos ilustrativas da degradação ocorrida ao longo dos ciclos de envelhecimento realizados. A cada ciclo concluído retirou-se as amostras da câmara climática, deixando-as a temperatura ambiente cerca de 30min e procedendo depois á sua pesagem.

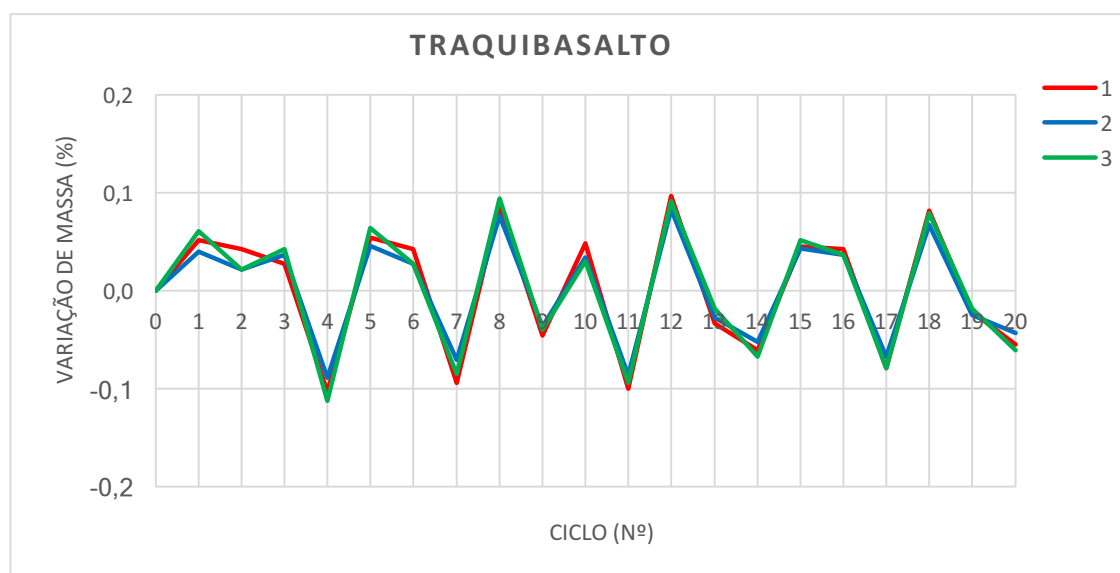


Figura 69 - Variação de massa do Traquibasalto.

Analisando o gráfico verificamos que ocorre, ao longo de todos os ciclos, uma variação de massa em que o peso dos provetes vai flutuando (aumenta ou diminui) conforme se trate de

uma pesagem realizada após um ciclo de verão ou de inverno. Sempre que se pesava a amostra após o ciclo de verão constatava-se que tinha havido um ganho de peso, relacionada com a presença de humidade neste ciclo. Se a pesagem fosse efetuada após o ciclo de inverno verificava-se o oposto, uma perda de peso que pode ser justificada pela ausência de humidade neste ciclo. Esta situação é comum aos vários tipos de rocha estudados. No geral a alteração de massa é pouco significativa, uma vez que o peso final do provete é aproximadamente igual ao seu peso inicial.

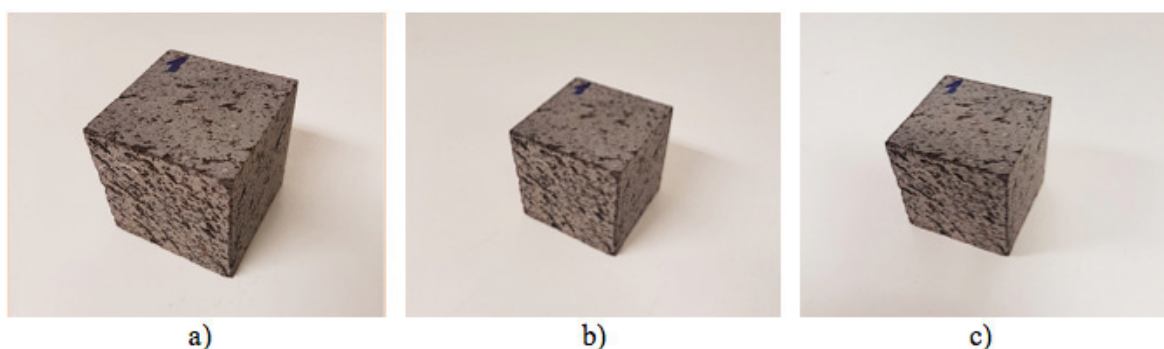


Figura 70 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 10º ciclo; c) Provete após o 20º ciclo.

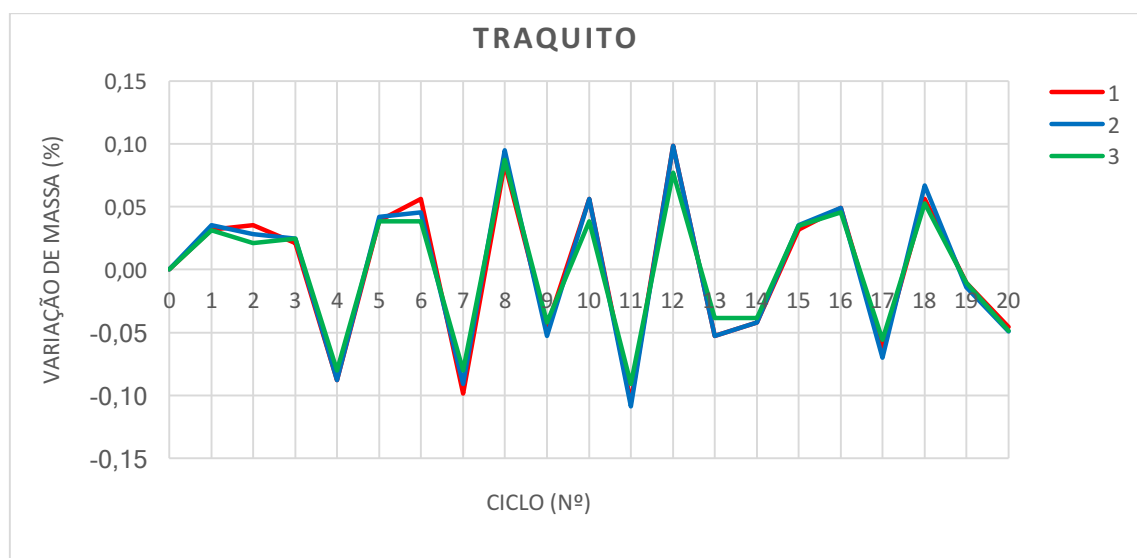


Figura 71 - Variação de massa do Traquito.

Em relação aos provetes do Traquito, o comportamento, em termos de variação de massa, é semelhante ao Traquibasalto. A variação de massa que ocorre é mais ou menos uniforme, em que o ganho e a perda de peso coincidem com o facto da pesagem ser efetuada após o ciclo de verão ou inverno, ficando assim o ganho de peso associado á pesagem após ciclo de

verão e a perda de peso à pesagem após ciclo de inverno. No final do ensaio o que se verificou foi que o peso inicial e o peso final dos provetes eram aproximadamente iguais.

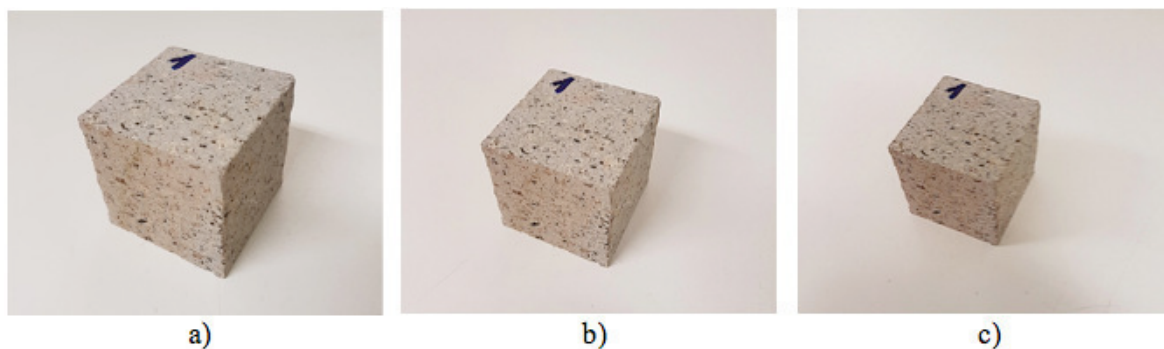


Figura 72 - a) Provetes após o 1º ciclo; b) Provetes após o 10º ciclo; c) Provetes após o 20º ciclo.

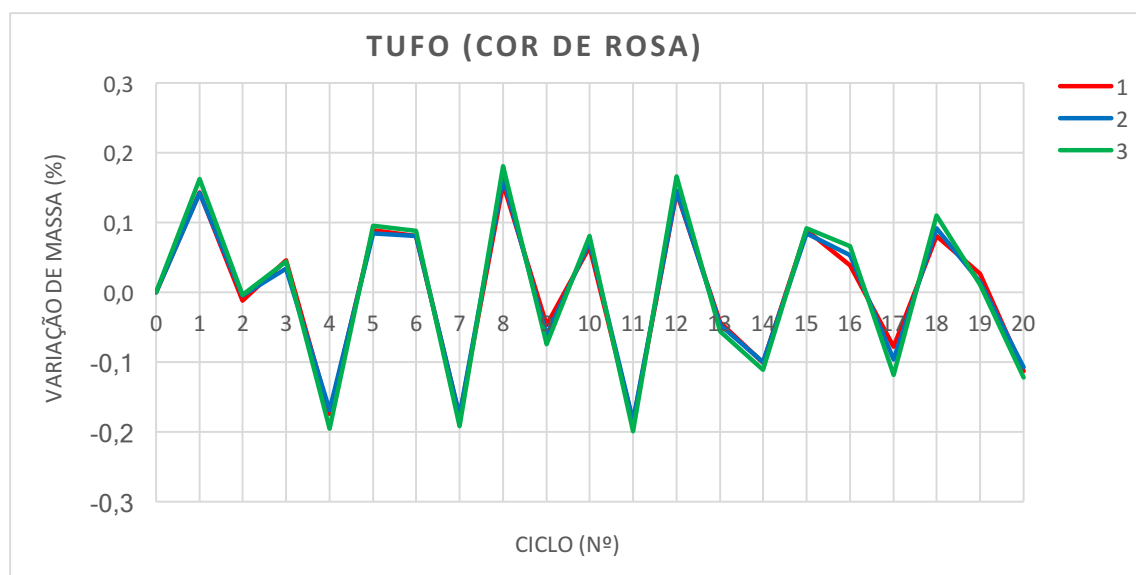


Figura 73 - Variação de massa do Tufo (Cor de rosa)

Os provetes deste tipo de rocha apresentaram uma variação de massa idêntica às anteriores, ou seja, ocorreu uma variação de massa mais ou menos uniforme ao longo de todos os ciclos realizados, sendo que no final do ensaio a diferença entre o seu peso inicial e o peso final era muito pequena.

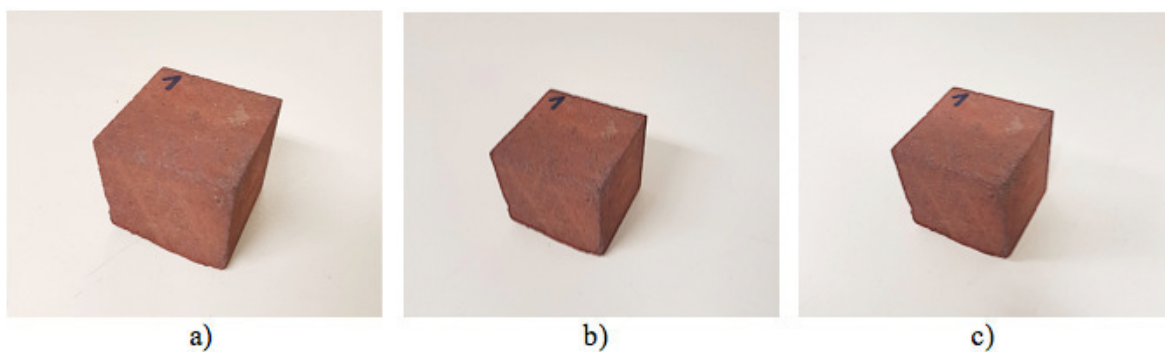


Figura 74 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 10º ciclo; c) Provete após o 20º ciclo.

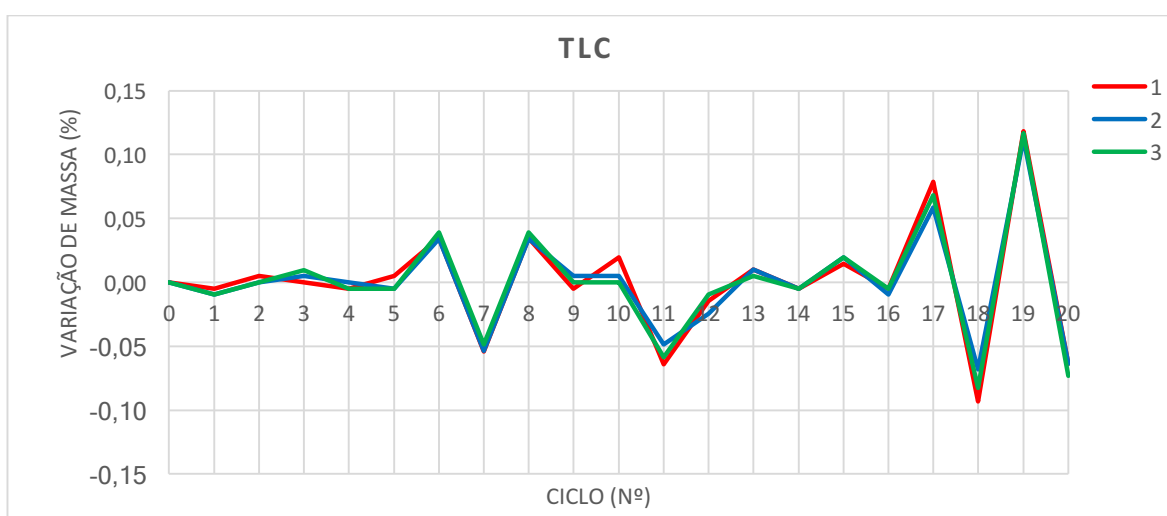


Figura 75 - Variação de massa do Tufo Lapilli Castanho

Nos provetes do Tufo Lapilli Castanho verificou-se também, á semelhança dos restantes, uma variação de massa mais ou menos uniforme, ainda que essa variação tenha sido discreta ao longo de quase todos os ciclos e algo abrupta nos últimos 3 ciclos. No entanto a diferença entre o peso inicial e o final também não é muito significativa.

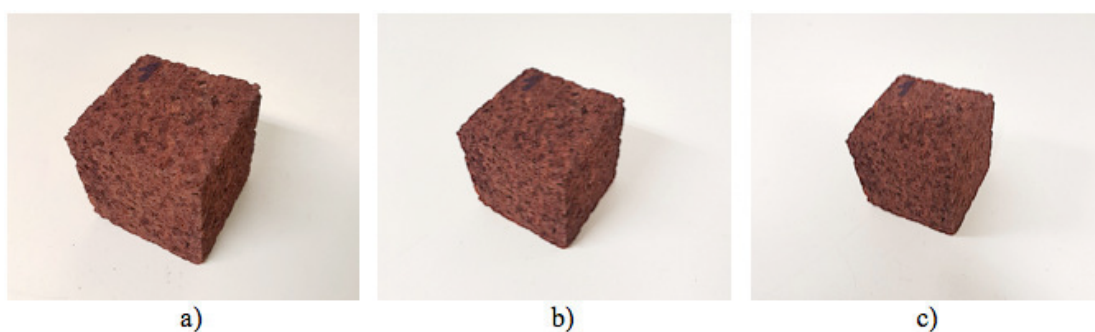


Figura 76 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 10º ciclo; c) Provete após o 20º ciclo.

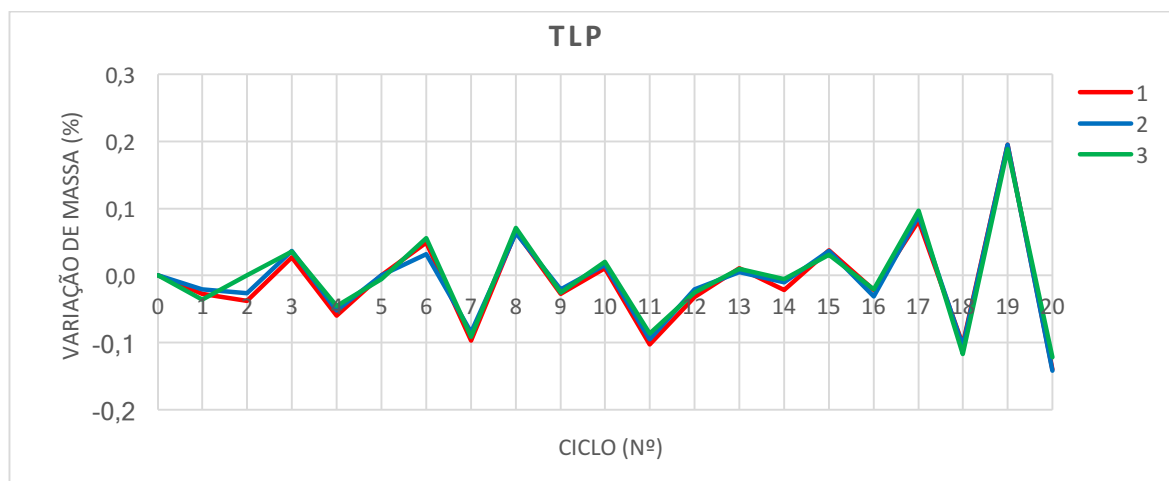


Figura 77 - Variação de massa do Tufo Lapilli Preto

No que diz respeito ao Tufo Lapilli Preto, os seus provetes revelaram uma variação de massa análoga à que se verificou para os provetes do Tufo Lapilli Castanho, onde desde o início do ensaio e quase até ao final a variação é menos acentuada e nos últimos 3 ciclos, sensivelmente, mais acentuada. O balanço final para o TLP é comum a todos os provetes testados, ou seja, a diferença entre o peso inicial e final dos seus provetes é pequena, não sendo por isso muito significativa.

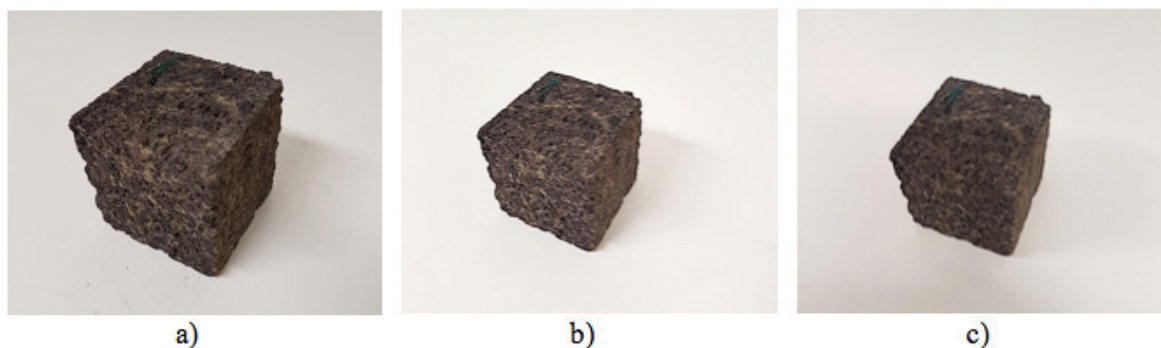


Figura 78 - a) Provetes após o 1º ciclo; b) Provetes após o 10º ciclo; c) Provetes após o 20º ciclo.

Como balanço final do ensaio, interessa dizer que, em geral, em termos estéticos as rochas aparentaram ter sofrido pouca ou nenhuma alteração. Em relação à variação de massa, aquilo que se verificou foi que rochas com valores de porosidade e densidade semelhantes tinham um comportamento comum. Ao comparar os gráficos obtidos para cada tipo de rocha verificou-se que o Traquibasilto, o Traquito e o Tufo (cor de rosa) tinham uma variação de massa análoga, o mesmo se verificou entre o Tufo Lapilli Castanho e o Tufo Lapilli Preto.

6.9.3 Ensaio de resistência ao envelhecimento por ação do nevoeiro salino

Em seguida serão apresentados gráficos que mostram como variou, ao longo do tempo, a massa das amostras, dos diferentes tipos de rocha e fotos ilustrativas da degradação ocorrida ao longo dos ciclos de envelhecimento realizados.

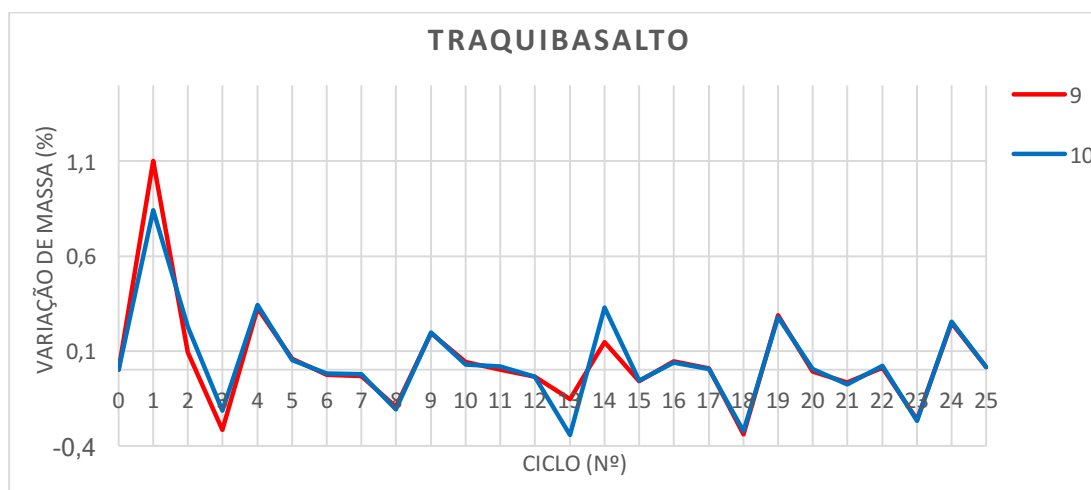


Figura 79 - Variação de massa do Traquibasalto.

Ao analisar o gráfico verificamos que as amostras de Traquibasalto sofreram uma variação de massa mais evidente logo no início do ensaio (mais concretamente nos 3 primeiros ciclos), sendo que a partir do 3º ciclo a variação foi mais discreta, observando-se um ganho ou perda de peso na ordem 0,3%. No que diz respeito a este parâmetro (variação de massa), ambos os provetes deste tipo de rocha tiveram um comportamento idêntico face ao envelhecimento.

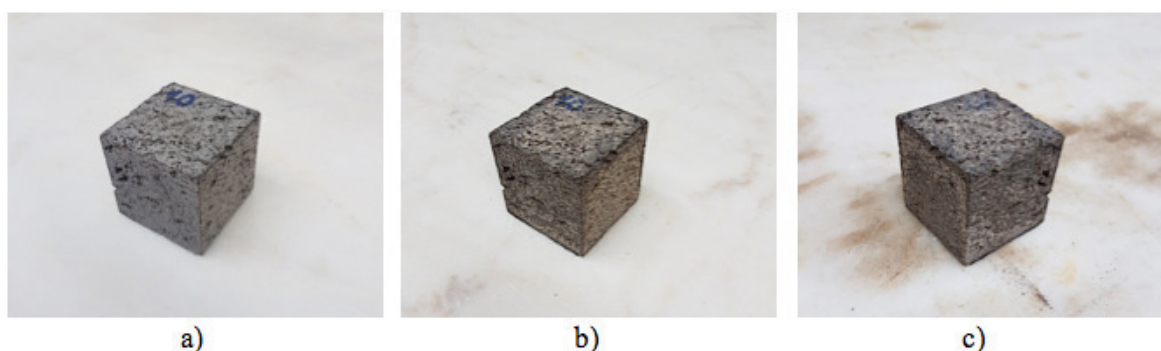


Figura 80 - a) Provette após o 1º ciclo; b) Provette após o 12º ciclo; c) Provette após o 25º ciclo.

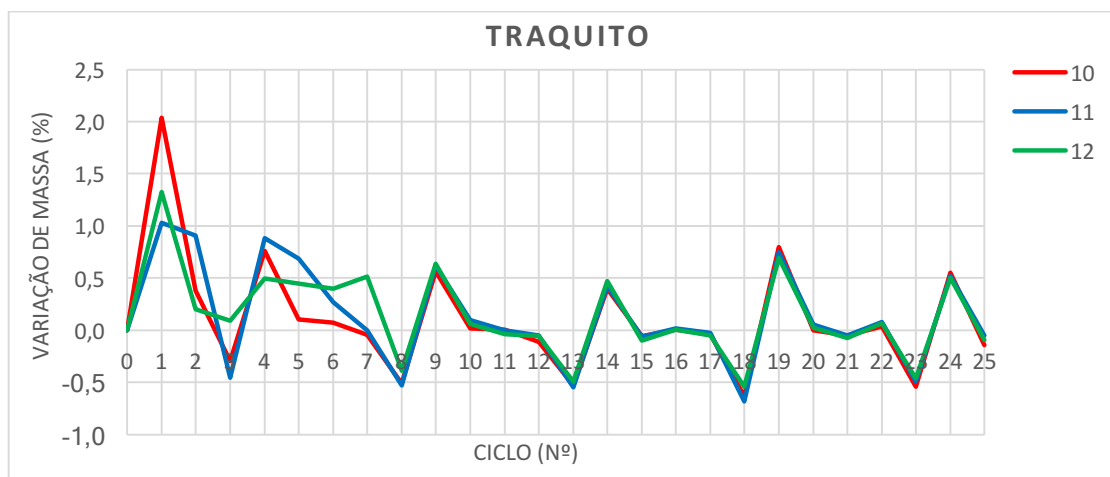


Figura 81 - Variação de massa do Traquito.

Nas amostras de Traquito aquilo que se observou, de forma geral, foi um comportamento semelhante em todos os provetes, onde num período inicial compreendido entre o início do ensaio e o 8º ciclo a variação de massa dos provetes foi diferenciada. A partir do 8º ciclo a variação de massa dos provetes foi praticamente coincidente.

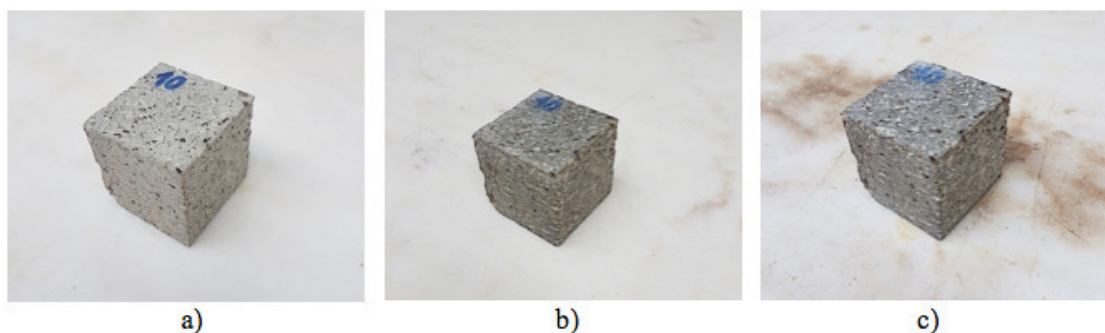


Figura 82 – a) Provede após o 1º ciclo; b) Provede após o 12º ciclo; c) Provede após o 25º ciclo.

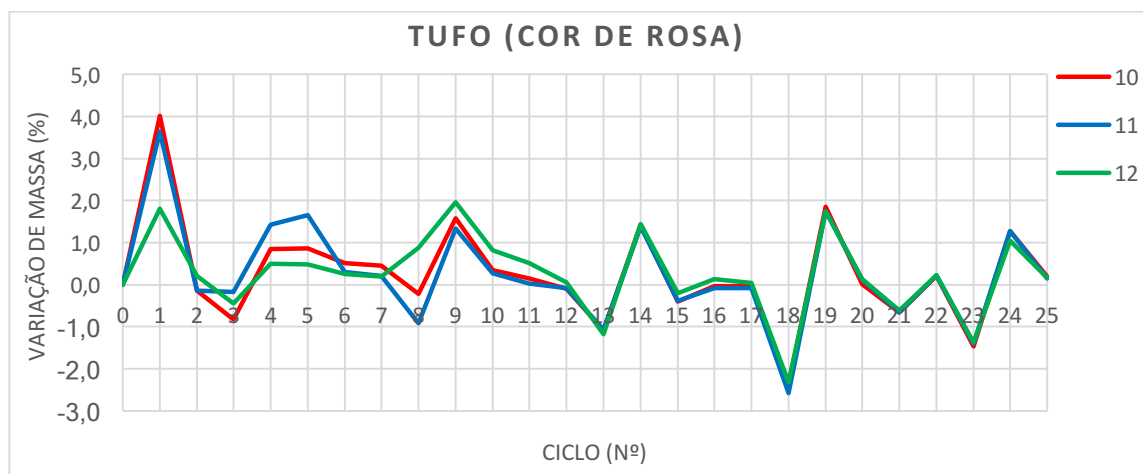


Figura 83 - Variação de massa do Tufo (Cor de rosa).

Os provetes do Tufo (cor de rosa) tiveram uma variação de massa diferenciada entre o início do ensaio e até cerca do 12º ciclo, a partir daí a variação de massa dos 3 provetes foi praticamente igual. No final do ensaio o peso dos provetes não era muito diferente do seu peso inicial.

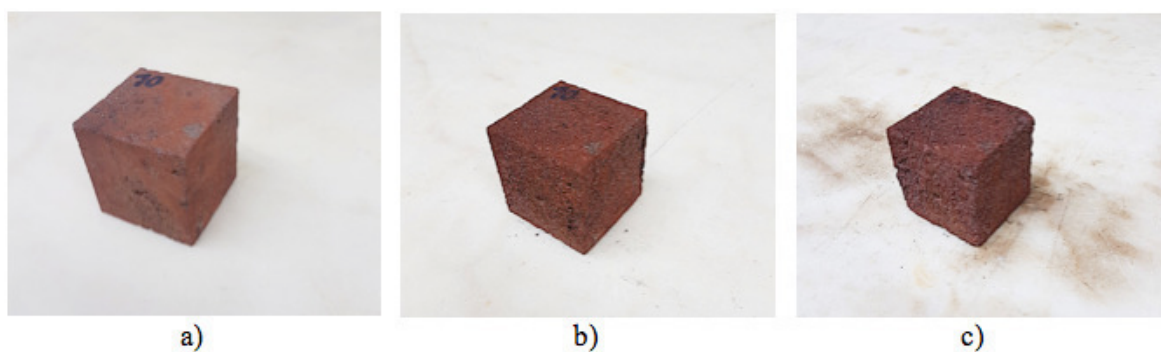


Figura 84 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 12º ciclo; c) Provete após o 25º ciclo.

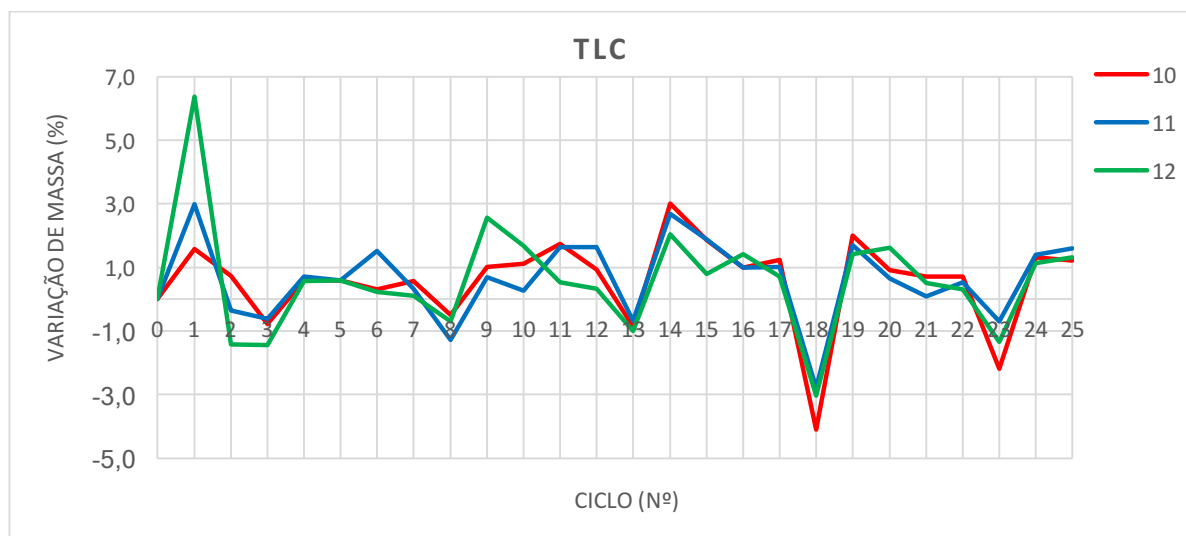


Figura 85 - Variação de massa do Tufo Lapilli Castanho.

Nas rochas anteriores (Traquibasalto, Traquito e Tufo) verificou-se um comportamento muito semelhante entre si, em que numa fase inicial ocorreu uma diferenciação mais vincada da massa dos provetes e depois a variação de massa era quase a mesma para todos os provetes. Para o Tufo Lapilli Castanho, aquilo que se verificou foi que os provetes deste tipo de rocha tiveram uma variação de massa distinta durante quase todo o ensaio.



Figura 86 - a) Provede após o 1º ciclo; b) Provede após o 12º ciclo; c) Provede após o 25º ciclo.

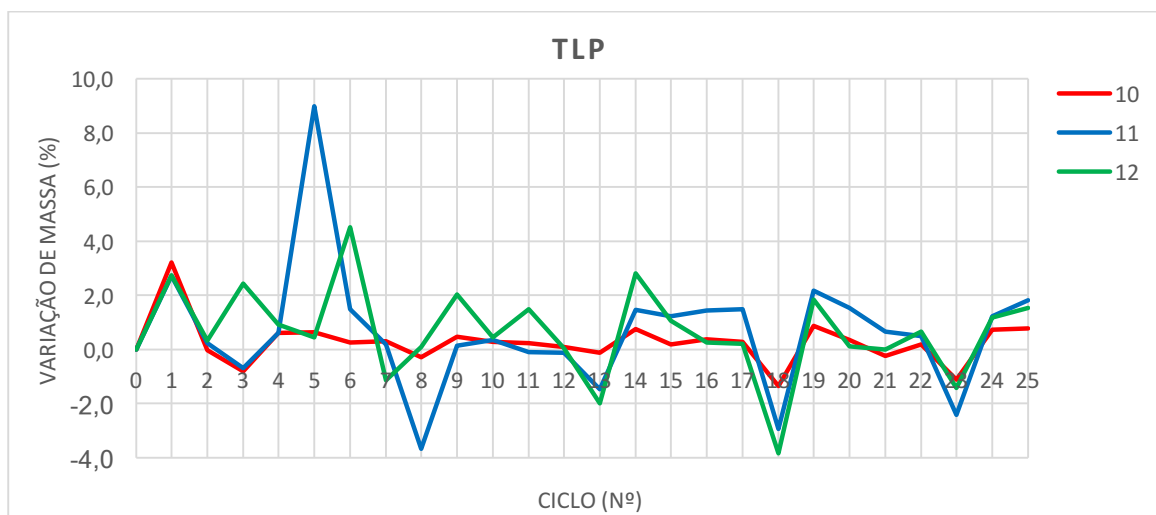


Figura 87 - Variação de massa do Tufo Lapilli Preto.

Nos provetes de Tufo Lapilli Preto o comportamento, em termos de variação de massa foi análogo ao dos provetes do Tufo Lapilli Castanho. O que se observou foi uma variação de massa distinta entre os vários provetes, no entanto essa variação foi pequena, estando na maioria das vezes na ordem dos 2%. Há a registar um pico na variação de massa do provete nº 11, em que este tem um ganho de peso de cerca de 9%. No final do ensaio, em sintonia com o que aconteceu para os restantes tipos de rocha, o peso dos provetes não era muito distante do seu peso inicial.

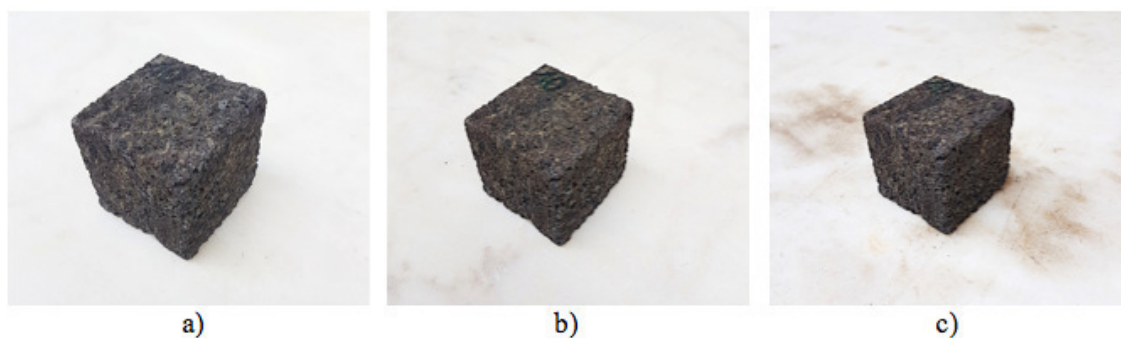


Figura 88 - a) Provete após o 1º ciclo; b) Provete após o 12º ciclo; c) Provete após o 25º ciclo.

Em síntese, importa referir alguns aspetos importantes e que mostram a alteração/degradação que se verificou nos provetes após o envelhecimento a que foram sujeitos.

Ao observar os provetes aquilo que salta á vista e que se verificou em primeiro lugar foi a alteração cromática. A cor das amostras alterou-se ficando num tom mais claro ao que

possuía inicialmente. Há ainda a registar a deposição de sais na superfície externa dos provetes ficando os mesmos com um aspeto esbranquiçado.

No que diz respeito à variação de massa, conforme já foi referido anteriormente, as duas variantes da cantaria rija (Traquibasalto e Traquito) e o Tufo cor de rosa tiveram um comportamento semelhante a este nível. O Tufo Lapilli Castanho e o Tufo Lapilli Preto tiveram uma variação de massa semelhante, comportamento espectável tendo em conta as características que têm em comum, como é o caso da porosidade.

Da observação dos provetes foi ainda possível identificar alguns efeitos produzidos pelo ensaio, nomeadamente: alveolização, erosão e em alguns casos, arredondamento ligeiro das arestas. Estes efeitos manifestaram-se de forma mais evidente no Tufo cor de rosa, Tufo Lapilli Castanho e Tufo Lapilli Preto, rochas estas que possuem elevada porosidade. Estes efeitos provocaram uma perda superficial de material, no entanto, de forma geral, em todos os provetes ensaiados, após uma flutuação de valores, verificou-se um aumento de peso, comparativamente ao peso inicial. Este aumento de peso pode ser explicado pela ocorrência de cristalização de sais no interior das rochas.

As rochas estudadas têm valores de porosidade aberta distintos, sendo por este motivo normal que tenham diferentes predisposições em relação à penetração do aerossol marinho no seu interior.

6.10 Determinação da resistência mecânica

Na tabela seguinte apresentam-se os valores médios do ensaio de compressão realizado aos vários tipos de rochas e nas diferentes condições em que se encontravam (envelhecidos ou não).

Para a cristalização de sais foram ensaiados apenas os provetes da rocha Traquibasalto uma vez que, devido á agressividade desse ensaio (cristalização de sais) a rocha que ainda apresentava as condições necessárias á realização da compressão foi o Traquibasalto.

Ao observarmos a tabela verificamos que existem alguns valores salientados que foram um pouco mais altos do que o esperado.

Tabela 22 - Tabela resumo dos valores médios, em Mpa, do ensaio de compressão.

	Provetes Sãos	Nevoeiro Salino	Variação Temperatura e Humidade	Cristalização Sais
Traquibasalto	82,8	74,9	73,4	80,2
Traquito	40,6	36,0	40,0	-
Tufo	24,2	18,7	23,8	-
TLC	9,0	8,7	11,3	-
TLP	8,1	9,4	9,7	-

Conforme se pode ver na tabela, a rocha que apresentou maior resistência à compressão foi o Traquibasalto. De forma geral, o Traquibasalto, o Traquito e o Tufo (cor de rosa) experienciaram uma diminuição da sua resistência mecânica após envelhecimento, comparativamente à resistência que os seus provetes são atingiram. Por outro lado, para o Tufo Lapilli Castanho e o Tufo Lapilli Preto verificou-se que nalguns casos existe um aumento da sua resistência mecânica.

No caso dos provetes de Tufo Lapilli Preto, envelhecidos por efeito do nevoeiro salino, poderá ter ocorrido cristalização de sais no interior da rocha conferindo-lhe desta forma uma resistência superior á obtida para os provetes são. Em relação aos provetes de Tufo Lapilli Castanho e Tufo Lapilli Preto, envelhecidos por variação de temperatura e humidade, um aspeto que justifica o aumento de resistência comparativamente aos provetes são é a anisotropia do material, havendo alteração de propriedades mecânicas consoante a direção em que é aplicada a compressão.

CAPÍTULO 7

Conclusão

Considerações finais

Propostas de trabalho futuro

7 CONCLUSÃO

7.1 Considerações finais

As condições climáticas têm um papel importante na degradação dos materiais aplicados nas construções. Essa degradação é particularmente evidente nas construções localizadas em zonas costeiras em que, para além das variações de temperatura e humidade, que normalmente se verificam, há ainda o efeito da névoa salina oriunda do mar. Neste trabalho realizaram-se ensaios no sentido de proceder à caracterização do material, bem como estimar a sua degradação a longo prazo, através de envelhecimento acelerado.

Considerando os resultados obtidos da absorção de água por capilaridade e absorção determinada através do método de cesto de rede metálica, conclui-se que as rochas que têm maior facilidade de absorver água são: o Tufo Lapilli Castanho e o Tufo Lapilli Preto. Foi para estas rochas que se obteve um valor maior do Coeficiente de Capilaridade e os valores mais altos de percentagem de absorção de água.

Os valores obtidos a partir da determinação da resistência mecânica das rochas foram diretamente proporcionais aos obtidos através do cálculo do módulo de elasticidade. Em rochas com valores superiores de módulo de elasticidade obteve-se também um valor mais elevado da resistência à compressão. A este nível os valores obtidos foram positivos.

Em relação ao comportamento que o material teve face à exposição ambiental, e referindo especificamente a resistência à cristalização de sais, aquilo que se apurou foi que a rocha com melhor comportamento foi o Traquibasalto, tendo em conta que foi a única rocha com capacidade de resistir à totalidade dos ciclos estabelecida pela norma correspondente. Este ensaio provocou efeitos devastadores na maioria das rochas que, após alguns ciclos, experienciaram uma forte desagregação.

A exposição a variações de temperatura e humidade relativa não provocou efeitos que possam ser considerados significativos, uma vez que após inspeção visual não foi detetada nenhuma alteração importante (fissuração, desagregação ou até mesmo alteração de cor). No final deste ensaio as rochas aparentavam ter o mesmo aspeto que tinham inicialmente.

No que diz respeito à exposição ao nevoeiro salino, todas as rochas tiveram um comportamento aceitável, sendo que aquelas em que se verificou mais desgaste, havendo alguma perda de material foram o Tufo cor de rosa, o Tufo Lapilli Castanho e o Tufo Lapilli Preto.

Todas as rochas estudadas são viáveis para aplicação em obra, no entanto há que salientar que em ambientes mais agressivos, ou seja, com variações bruscas de temperatura, em que se registem extremos, tanto no verão como no inverno, e com localização em zonas costeiras ou próximas do litoral, onde há o efeito da névoa salina proveniente do mar, será aconselhável a utilização de Traquibasalto ou Traquito, visto serem estes os tipos de rocha que apresentaram melhores resultados em todo o trabalho laboratorial realizado. Na ilha da Madeira, local de onde foram recolhidas estas rochas, é possível vermos aplicadas em obra todos os tipos de rocha estudados, mas o Traquibasalto e o Traquito são, de facto, aquelas que se encontra com mais frequência.

7.2 Propostas de trabalho futuro

Numa perspetiva de trabalho futuro, seria interessante haver um caso de estudo, em que fossem aplicados revestimentos pétreos nas fachadas de um determinado edifício localizado, preferencialmente, numa zona costeira. Seria estabelecido um período de exposição (de um, dois ou mais anos) e posteriormente seriam retiradas algumas amostras para análise. A grande mais valia desse trabalho seria depois comparar os resultados que obtivemos nesta tese (num contexto laboratorial, com todas as limitações que lhe são inerentes) com os resultados que seriam obtidos numa situação real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires-Barros, L. (2002). Património Cultural Construído : algumas notas para o seu estudo e preservação, 11–14.
- Amaral P.M., Fernandes J.C., Pires V., R. L. G. (2015). Ornamental Stones. In *Materials for Construction and Civil Engineering* (pp. 397–445).
- Bieniawski, Z., Franklin, J., Bernede, M., Duffaut, P., & F., R. (1978). *CompressiveStrengthRockMaterials.pdf*.
- Carmo, R. (2012). *Aspetos Materiais da Construção em Xisto em Portugal* Material Issues of Schist Construction in Portugal. Universidade do Minho.
- Carvalho, C. (2015). Estudo da influência do nevoeiro salino nas propriedades de calcários portugueses. Universidade Nova de Lisboa.
- Carvalho, N. (2013). Caracterização e avaliação da durabilidade de produtos de construção contendo bagacinas. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia.
- Castro, B. (2006). *Marcação CE de Agregados e de Pedra Natural*. Universidade de Aveiro.
- CORP., E. (2017). *Advanced reliability Environmental Stress Chambers for tomorrow ' s environmental needs*.
- Costa, A., Guimarães, A., Arêde, A., Begonha, A., Medeiros, C., Paupério, E., ... Freitas, V. (2012). *Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos*. (O. dos E. da R. Norte, Ed.) (1a Edição). Porto.
- Farnell. (2004). *Ultrasonic Pulse Velocity Testing Technical Reference Manual* (Vol. 44).
- Ferreira, A. (2013). *Argamassas industriais para rebocos de edifícios antigos - comportamento face à ação de sais solúveis*. Instituto Superior Técnico. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145927642/Dissertação.pdf>
- Franco, J. (2017). *Aprender Madeira*. Retrieved from <http://aprenderamadeira.net>
- Germinario, L., Andriani, G. F., & Laviano, R. (2015). Decay of calcareous building stone under the combined action of thermoclastism and cryoclastism: A laboratory simulation. *Construction and Building Materials*, 75, 385–394.

- <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.035>
- <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137387835/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. (2005).
- IPQ. (2004). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.
- James, W. B., & Pease, L. F. (2017). Salt Spray and Immersion Corrosion Testing of Pm Stainless Steel Materials.
- Katzoff, G. Y. (2006). Fracture of Porous Materials Induced by Crystallization of Salt. Massachusetts Institute of Technology.
- Lubelli, B. (2006). Sodium chloride damage to porous building materials. Polytechnic of Milan.
- Machado, B. (2012). Identificação e caracterização das litologias e patologias da Sé de Lamego - Um estudo sobre alteração em monumentos graníticos. Universidade de Trás-os-montes e Alto douro.
- Mata, J. ., Fonseca, P. ., Prada, S. ., Rodrigues, D. ., Martins, S., Ramalho, R. ., ... Matias, J. (2013). O arquipélago da Madeira.
- Mendes da Silva, J. A. R., Torres, I., Subtil, A., Martins, S., Moura, A., & Silva, H. (2009). Anomalias de revestimentos de fachada e soluções de reabilitação. Coimbra: José António Raimundo Mendes da Silva.
- Monteiro, B. (2012). Influência do nevoeiro salino na degradação de materiais cerâmicos aplicados em construções.
- Neto, N., & Brito, J. De. (2011). Sistema de apoio à inspecção e diagnóstico de anomalias de revestimentos em pedra natural (RPN). Teoria E Prática Na Engenharia Civil, 23–38.
- Neves, L. da C. P. (2013). Análise de Revestimentos Tradicionais da Madeira. Universidade de Aveiro.
- Normalização, comité europeu de. (2002). EN1015_18.pdf.
- Nós cidadãos e a região autónoma da Madeira. (2017). Retrieved February 20, 2017, from <https://noscidadaos.pt/2014/10/05/nos-cidadaos-e-madeira-regiao-autonoma/>

- Palhais, C., Carreira, R., & Felgueiras, S. (2015). Jornal janeiro/abril 2015 18.
- Sepúlveda, S. (2011). Avaliação da Precipitação Extrema na Ilha da Madeira Engenharia do Ambiente, 21–26.
- Silva, A. (2009). Previsão da vida útil de revestimentos de pedra natural de paredes. Instituto Superior Técnico.
- Silva, J. (2007). O tempo escrito nas rochas. Portugal. Retrieved from <http://www.rtp.pt/programa/tv/p22388>
- Silva, J., & Gomes, C. (1997). Pedra Natural Do Arquipélago da Madeira - Importância Social, Cultural E Económica. Câmara de Lobos.
- Silva, J., & Gomes, C. (2004). Tipologia da pedra natural utilizada em esculturas concebidas e executadas no âmbito do Simpósio Internacional de Escultura em Pedra – SINEP 2004 , Câmara de Lobos , Região Autónoma da Madeira (pp. 77–98).
- Silva, J., & Gomes, C. (2016). Pedra Natural. Retrieved from <http://aprenderamadeira.net/pedra-natural/>
- Silva, J. M. B. (2013). Estudo da durabilidade do revestimento de paredes exteriores. Faculdade Engenharia Universidade do Porto.
- Simão, J., Leal, N., & Zoghلامي, K. (2014). Accelerated aging experiments with saline fog , involving ventilation in calcarenitic monument rocks, 1181–1185.
- Veiga, M., & Malanho, S. (2009). Revestimentos de pedra natural - Metodologia de Diagnóstico e Reparação de Anomalias. Lisboa.
- Velho, J., & Castro, B. (2004). Ce Marking of Natural Stone Products . Two Case Studies.
- Velosa, A. (2006). Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas.